

複雑系への情報技術の応用に関する 調査研究 報告書

平成 11 年 3 月



財団法人 日本情報処理開発協会



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。



まえがき

近年、自然界の振る舞いや社会の諸現象を複雑系（Complex System）として捉えた研究が盛んになっています。これは要素還元主義に基礎を置く従来の科学の方法論に対して、新たな研究の枠組みを与えるものとして注目されています。情報処理の分野においても、これまで人工知能（AI）等の知的情報技術が処理の対象としてきた、持続的に変化し、その変化の予測が難しい現実世界の複雑な諸問題の解決のための方法論を与えるものとして期待されています。

このような状況のもと、当協会では、平成9年度より「複雑系情報処理」に関する調査研究を進めてまいりました。

今年度は、調査研究の最終年度として、平成9年度の研究動向調査の成果を踏まえ、①複雑系の見方あるいは対象としての（人工）知能、②複雑系（扱う対象）としてのプログラム、③複雑系としてのネットワーク、④複雑系としてのマルチエージェント（システム）、⑤複雑系としての言語、⑥複雑系としての生命（現象）の6つの視点から複雑系情報処理について考察を行いました。

実施にあたっては、知的情報技術動向調査委員会（委員長 大須賀 節雄 早稲田大学理工学部 情報学科 教授）に複雑系情報処理調査専門委員会（委員長 中島 秀之 通商産業省工業技術院電子技術総合研究所 情報科学部 部長）を設置して、調査研究の基本方針、個別テーマの審議・検討を行うとともに、総括的な検討を目的として「シンポジウム」を開催しました。また、欧米に調査員を派遣して、並列・分散システムの数理モデル等の複雑系に関連する基礎理論、複雑系アプローチの経済、金融分野への応用、研究動向について最新の情報を収集しました。

報告書は5章から構成され、1章では、複雑系情報処理を考える視点、2章では、上記6つの視点からの考察、3章では、2章での考察に関連する研究事例、4章では、欧米における複雑系研究の動向（海外調査報告）、5章では、複雑系に関連する内外の研究情報とその分析結果、についてまとめています。

本書が広く各界の方々に活用されることを念願する次第です。

最後に、本調査研究の実施にあたり、ご指導ご協力いただいた委員各位ならびに関係各位に深甚なる謝意を表する次第であります。

平成11年3月

財団法人 日本情報処理開発協会

委員会名簿

知的情報技術動向調査委員会

(敬称略、50音順)

委員長：

大須賀 節雄 早稲田大学 理工学部 情報学科 教授

委員：

岡本 吉晴 (株)三菱総合研究所 取締役 情報技術研究センター長

加藤 守利 東京電力(株) 技術開発本部 システム研究所 数理解析グループ グループマネージャー

(前任) 萩原 淳 東京電力(株) 技術開発本部 システム研究所 数理解析グループ 主管研究員

諏訪 基 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 次長

武井 欣二 東京都立航空工業高等専門学校 電子工学科 講師

玉井 哲雄 東京大学 大学院 総合文化研究科 広域システム科学系 教授

中島 秀之 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報科学部 部長

那須 宗也 日揮情報システム(株) 専務取締役

服部 文夫 NTTソフトウェア(株) 技術開発部エレクトロニックコマース技術センター 部長

市川 隆 (財)日本情報処理開発協会 常務理事

オブザーバ：

山本 雅亮 通商産業省 機械情報産業局 電子政策課 課長補佐

根津 正志 通商産業省 機械情報産業局 電子政策課 国際係長

事務局：

片岡 幸一 (財)日本情報処理開発協会 技術企画部 技術課長

田盛 正人 (財)日本情報処理開発協会 技術企画部 主任部員

複雑系情報処理調査専門委員会

(敬称略、50音順)

委員長：

中島 秀之 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報科学部 部長

委員：

池上 高志 東京大学 大学院総合文化研究科 広域システム科学系 助教授

稲吉 宏明 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報アーキテクチャ部 主任研究官

木下 佳樹 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 情報アーキテクチャ部 主任研究官

佐藤 理史 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 助教授

竹内 郁雄 電気通信大学 電気通信学部 情報工学科 教授

津田 一郎 北海道大学 大学院理学研究科 数学専攻 教授

出口 弘 京都大学 経済学部 助教授

橋田 浩一 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 知能情報部 主任研究官

村上健一郎 日本電信電話(株) NTT 光ネットワークシステム研究所 主幹研究員

オブザーバ：

根津 正志 通商産業省 機械情報産業局 電子政策課 国際係長

事務局：

片岡 幸一 (財)日本情報処理開発協会 技術企画部 技術課長

田盛 正人 (財)日本情報処理開発協会 技術企画部 主任部員

目 次

まえがき

1. 複雑系情報処理の視点 -----	1
1.1 はじめに -----	1
1.2 物理学の見方 -----	1
1.3 システム論の見方 -----	3
1.4 情報処理の見方 -----	5
1.5 今後の展開 -----	5
2. 複雑系の考え方 -----	7
2.1 複雑系としての（人工）知能 -----	7
2.1.1 複雑系としての人工知能 -----	7
2.1.2 複雑系としての知能 -----	9
2.2 複雑系としてのプログラム -----	12
2.2.1 離散系のもつ複雑さ -----	12
2.2.2 S-S、C-S、S-C、S-C-S -----	13
2.2.3 コネクティクス -----	15
2.2.4 プログラミングにおける複雑系 -----	18
2.3 複雑系としてのネットワーク -----	22
2.3.1 複雑系の様相を見せるインターネット -----	22
2.3.2 開放系ネットワークとしてのインターネット -----	22
2.3.3 コネクティクスと自己組織化—階層とフィードバック— -----	24
2.3.4 ネットワークのエンジニアリングと複雑系—研究への展望— -----	25
2.4 複雑系としてのマルチエージェントシステム -----	27
2.4.1 自律的エージェントからなる複雑系 -----	27
2.4.2 情報処理と複雑系 -----	28
2.5 複雑系としての言語 -----	36
2.6 複雑系としての生命（現象）—知能も含めた生命現象の捉え方— -----	38
2.6.1 "flow-ism"（「流態主義」）および"mutual manipulation"（「相互操作」） -----	38
2.6.2 "blind-ism"（「盲目主義」） -----	44
2.6.3 "collective reliability"（「集団的信頼性」） -----	44
2.6.4 振舞いのD/E (=Detectors/Effectors) 依存性 -----	46
3. 複雑系の研究事例 -----	47
3.1 部分性と複雑性 -----	47
3.1.1 記述のレベルと複雑性 -----	47

3.1.2 文脈と多様性 -----	49
3.1.3 制 約 -----	50
3.1.4 巡回路の対称性 -----	53
3.1.5 環境への埋め込み -----	55
3.1.6 不変項と境界条件 -----	58
3.2 プログラムの複雑さに関する研究事例 -----	61
3.3 複雑系としてのネットワーク -----	65
3.3.1 インターネットは複雑系か？ -----	65
3.3.2 自己組織化を行うネットワーク -----	70
3.3.3 自己組織化ネットワーク研究への展望 -----	78
3.4 エージェント指向の複雑系の情報処理研究の現状 -----	79
3.4.1 ミシガン大学 -----	79
3.4.2 アイオワ州立大学 -----	79
3.4.3 サンタフェ研究所 -----	80
3.4.4 南カリフォルニア大学 -----	80
3.4.5 スタンフォード大学 -----	81
3.4.6 サーレイ大学 -----	82
3.4.7 結 論 -----	82
3.5 インターネットのためのテキスト処理 -----	83
3.5.1 インターネットのためのテキスト処理 -----	83
3.5.2 現在の主要技術 -----	86
3.5.3 情報の自動編集 -----	92
3.6 知能も含めた生命現象構築の試み -----	100
3.6.1 細胞もどき (celloid) モデル -----	100
3.6.2 神経細胞もどき (neuronoid) モデル -----	110
4. 海外動向調査 -----	119
4.1 米国調査 I -----	119
4.1.1 Stanford 大学 -----	119
4.1.2 Xerox PARC -----	119
4.1.3 Santa Fe Institute -----	120
4.2 米国調査 II (The 6th International Conference on Computational Finance (CF99) 報告) ----	129
4.2.1 概 要 -----	129
4.2.2 ピックアップ論文 -----	130
4.3 欧州調査 I -----	138
4.3.1 Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) -----	138

4.3.2 École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)	146
4.3.3 Helsinki University of Technology (HUT)	149
4.3.4 まとめ	155
4.4 欧州調査Ⅱ	156
4.4.1 はじめに	156
4.4.2 プログラム意味論と複雑系	156
4.4.3 14th Mathematical Foundations of Programming Semantics (MFPS)	158
4.4.4 Basic Research In Computer Science (BRICS)	159
4.4.5 University of Edinburgh	160
5. 複雑系研究の動向ー複雑系研究マップー	163
5.1 日本国内における複雑系研究の実態調査	163
5.1.1 既存調査範囲の分析	164
5.1.2 追加調査	175
5.1.3 日本国内の複雑系研究マップ	179
5.2 欧米諸国における複雑系研究の実態調査	187
5.2.1 既存調査の分析と追加調査	187
5.2.2 欧米諸国の複雑系研究マップ	191
5.3 まとめ	196
5.3.1 研究内容の傾向に関する考察	196
5.3.2 組織形態・規模に関する考察	197
資 料	
A 複雑系研究一覧（国内編）	199
B 複雑系研究一覧（欧米編）	245

1. 複雑系情報処理の視点

1. 複雑系情報処理の視点

中島 秀之 委員長 (電子技術総合研究所)

池上 高志 委員 (東京大学大学院 総合文化研究科)

1.1 はじめに

人工知能の研究は複雑系の研究である。そう考える理由を以下で述べる。

複雑系というのはそもそも物理学の分野で使い始められた用語である。日本では金子、池上、津田ら[1][2]が使い始めた。

一方、情報処理、特に人工知能の研究においては初期の頃から“複雑な”人工システムの取り扱いが問題にされて来た[3]。またフレーム問題という形で記述や処理の不完全性が問題になっている。つまり、“複雑系”という用語は最近まで使われなかったが、複雑系の視点は内在していたといえる。

参考文献

- [1] K. Kaneko and I. Tsuda. Constructive complexity and artificial reality: An introduction. *Physica D*, 75(1), 1994.
- [2] 研究会報告: 複雑系. 物性研究 59-3 (12月号), 物性研究刊行会, 1992.
- [3] Herbert A. Simon. *The Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, second edition, 1981.
- [4] H. R. Maturana and F. J. Varela. (河本英夫訳, オートポイエーシス). 国文社, 1991.
- [5] 河本英夫. オートポイエーシス. 青土社, 1995.
- [6] 松岡正剛ほか. 複雑性の海へ生命から社会まで ~ 12 の扉, NTT出版(株), 1994.
- [7] 橋田 浩一. 知のエンジニアリング: 複雑性の地平, (株)ジャストシステム, 1994

1.2 物理学の見方

物理で複雑系的な見方が出現したのは、カオスの発見と研究が大きく貢献している。それはとりもなおさず計算機による発見（あるいはウラムのいうところの実験数学）という形の研究が出現したからである。それまでの物理学における計算機の研究の多くが、理論の実証という形にすぎなかったのに対し、カオスの発見以降、計算機のシミュレーションそのものを実験と考え、新しい現象の現象論を組み立てて理論構築をめざすこととなった。カオスは数学的な理論と同時に計算機による計算と可視化が威力を発揮した。

このとき必ずしも自然界の精密な再現と考えないところが重要である。計算機がますます高速化されると、とにかくそのまま計算機につっこむことが「正しい」モデル

であると思われがちであるが、複雑系はモデルのあり方を変更した点が大きい。現象の本質と思われるものの計算機のモデルを考えるということが、複雑系のモデルにおいてはより価値が置かれている。その意味で、いわゆる計算物理といわれるものと複雑系は非常に遠く、むしろもともと理論物理学のもっていた思想と方法論の延長上にあるといえるだろう。このことはあまり認識されていない。

一方で伝統的な物理学との遊離は、物理学でいうところの「ユニバーサリティ」思考をどのくらい持つかにあるといえるだろう。物理学では、徹底して現象を裸にし、みんなが基礎とするモデルをつくり、異なる現象の中に見出される普遍的性質（「ユニバーサリティ」）を強く信奉している。例えば複雑系の研究を立ち上げさせたカオスですら、強い「ユニバーサリティ」信奉のもとに構築された分野でもある。複雑系にも「ユニバーサリティ」といった考え方がないわけではないが、それよりもむしろ、「ものの多様性をどうとらえるか」により視点（まなざし）の方向が据えられているといえよう。世界の個別性と特殊性が、普遍性とどういう形で対峙しているのか、ということに興味をもちモデルがつくられる。メタフォリカルにいうならば、異なる現象のロゼッタストーンをつくるのではなくて、ロゼッタストーンが作りえないそのことを考えようという発想である。そういうことを意識したモデルは、いわゆるストーリー構築的な解釈とよばれ、主体的な認識を重んじる傾向が生まれてる。そうした研究の方向は、また文学的であると「批判」されている。科学である以上普遍的な構造こそが至上のものであって、それ以外のものに目を向けたストーリー構築は科学としては市民権を得られないのか。複雑系の研究は現在そうした状況にある。

1.3 システム論の見方

理解の仕方の背後には、好むと好まざるとにかかわらず、あるシステム論が横たわっている。例えば時計を例にとってみると、時計を分解してその仕組みがわかると考える姿勢の背後には、個々の部品の集大成としてのシステムという考え、機械論的システム論が横たわっている。例えば今の分子生物学の研究はこの機械論的なシステム理論に基づいているように思われる。個々の部品の性能や他の部品とのつながり具合や組合せ方を調べるといったやり方で、細胞や遺伝の仕組みをみていくために、細胞や遺伝の仕組みはずいぶんこみいった機械になってしまう。

これに対して複雑系の研究は、別のシステム論を用意する。それは各要素同士の相互作用を一意的には決められないような、相互作用に多義性を持たせたシステム論である。機械論的なシステム論が、システムを構成する要素とその相互作用の仕方をシステムの設計者が勝手に与えてやるのに対し、複雑系がもととするシステム論は、相互作用のあり方を内部的に決定させようとする。たとえばそれは、要素の相互作用は人間の自然言語のようなものだとする考えである。あるシステム内で取り交わされるいくつかの文章が仮にシステムの外の人間にとっては同じであっても、内部的にその意味するものは同じではありえない¹。

こうしたシステム論は生氣論「生命現象には物理や化学の法則を超えた独自の原理や活力があるとする考え」とは異なる。われわれが生氣論を作りたくなるような対象（つまり生命そのもの）を研究するために、生氣論をベースとしてしまつては本末転倒である。そのかわりに、相互作用のあり方がシステムの外からは一意的には決められないような（無理に言うとするれば、有機的なあるいは柔らかい）機械論」を考えているのである。別の言い方をするならば、そういったシステム論とはオートマトンの理解を越えることでもある。

確かにかつてフォンノイマンは29状態の有限オートマトンによって自己複製のモデルをつくってみせ、チューリングは人間の思考過程をやはりチューリングマシンというオートマトンとして書いて見せた。しかし、ここで求めるモデルは、そういうオートマトンで書く事の出来ないシステムのことである。オートマトンで書く事ができないとは、どういうことであろうか。チューリングマシンを例に考えれば、再帰的な記述（テープ）を与えることはできるがそれを読み書きするマシンは再帰的に実行できないようなシステムを考えることでもある。それはいわば再帰的でない再帰性である。例えば、池上・橋本のモデル[1][2][3]では、いくつかのマシンとテープの反応系を想定しその中からどのような恒常的反應のネットワークが出現するかを解析している。そこでマシンがテープを書き込む際に加えられた「ノイズ」は、まさにそのようなマ

1 システムの外から決めた通りに内部における意味が決まらない場合をわれわれは単に、生命と呼ぶにすぎないのかもしれない。

2 しかしこのように再びノイズを導入することで揺らがせてしまうことは、もちろん越えられなければならない。膜によって隔てられたマシンとテープの反応系が示す進化能力の遺伝[1]は、ノイズに代わるものとして、外部のマシンの書き換えを想定している。

シンの実行過程における再帰性の揺らぎであった²。

もとにするシステムの考えが今までの科学と違うのだから、その結果の解析や理解の仕方もうろいろと変わってくる必要がある。進化や細胞分化や死は、いままでの機械論で定義をしようとするとう逃げてしまう。例えば「細胞の積極的な死」という言葉にひかれて生物の専門書を繰ってても、アポトーシス[あらかじめプログラムされた細胞死]を引き起こす化学物質が次々と登場してくるだけで、細胞の「死」とはなにか、は分からないというジレンマに陥る。同じジレンマは、免疫系が認識するという身体の「自己」や、脳が持つ精神の「自己」、「進化」はどこに存在するか、といった問題にもみることができる。われわれはむしろ、死や進化や自己をシステムとして最初に構成し、それを保つ仕組みとしての構成要素を、その後から構成する必要すらある。例えば、細胞の機能というのを中身を見ずに考えて、その機能を保つのに必要とされる内部構造を後から考える立場である。そうした上のレベルから、遺伝子やミトコンドリアが内部構造として要請されるかもしれない。もし実際の細胞とはまったく違った内部構造が要請されたとしたら、それはかえって面白いということができよう。それは細胞の働きをつくりだす構造はひととおりととは限らなかったことが分かるからである。そのとき要請される内部の構造は理論的実体であり、それはけっしてウェットウェアやハードウェアの研究では見付きり得ないものであろう。そうした理論的実体こそ、われわれの素朴実在論を凌駕すると思うのであり、それが今後も尚計算機のシミュレーションをもととした「ソフトウェア」の研究が発展する事のできる鍵かと考えている。

参考文献

- [1] Ikegami, T., *Evolvability in Machines and Tapes in Artificial Life and Robotics*, 1998.
- [2] Ikegami, T., Hashimoto, T., *Replication and Diversity in Machine-Tape Coevolutionary Systems Artificial Life V* (eds. C. Langton and K. Shimohara, MIT press), pp.426--433, 1997.
- [3] T. Ikegami and T. Hashimoto, *Coevolution of Machines and Tapes Artificial Life 2*, pp. 305--318, 1996.

1.4 情報処理の見方

情報処理においても、見方の転換が起こりつつある。初期の情報処理の方法論はやはり物理や数学の伝統に則ったもので、アルゴリズムの研究が主であった。アルゴリズムというのは、それに従えば結果が有限時間で得られるような一定の手続きのことを言う。そのようなアルゴリズムの性質として計算オーダー（データ量に対する計算量の見積もり）を研究する場合にも最悪の場合の値を保障するものが多かった。例えばソートのアルゴリズムが $n \cdot \log(n)$ の計算オーダーであるという場合でも、運良くデータが最初から順にならんでいれば $O(n)$ でチェックできることもある。実は一番欲しいのは“典型”的な場合の計算オーダーなのだと思うが、“典型”を厳密に扱うことは困難なため、一部を除いてはあまり考慮されて来なかった。

一方、人工知能研究ではヒューリスティクスを中心として研究されて来た。ヒューリスティクスはアルゴリズムと異なり、通常はうまく行くが、たまには失敗するような手続きである³。

現在の情報処理においては全体を一度に扱えるようなトップダウン方式は、一部の例外を除いては存在しない。そこで大規模問題を扱うアルゴリズムは通常“分割統治”方式を採る。しかし、複雑系では分割によって失われる全体の性質がある。つまり分割して完全処理を行なうということができない。アルゴリズムではなくヒューリスティクスを考えなければならない。

本当に複雑なシステム（複雑系とは限らない）というものの直観を持っているのはプログラマだけであろうと言う人もいる⁴。実際、巨大なシステムのデバッグ経験を持つ人でないと複雑系を実感することは困難かもしれない。

1.5 今後の展開

この2年間の調査を通じて見えてきた複雑系情報処理の問題点がある。それは、多層システムのプログラミングの方法論がないということである。

知能の扱う対象は複雑である。複雑なものというのは多層でできている。例えば社会は個人、家庭、会社、国家などの層で見ることができるし、それらすべての層が本質的である。社会のシミュレーションをすることを考えると、それらすべての層に関するプログラムを書く必要がある。これまで、一つのシステムを複数の層のプログラムで動かした例はない。個人のプログラム単独でも動くし、会社のプログラム単独でも動き、しかも両方を同時に走らせても動くようなプログラミング手法はまだ存在しない。

3 初期には“発見的手法”と訳されたこともあるが、“経験的手法”の方が正しいと思う。

4 Brian Smith.私信。

多層のプログラミングとは以下の条件を満たすものとして定義する。

1. 独立に記述される層が複数ある。
2. 各々の層は、その層のプログラムによって動作が完全に規定される。
3. 層の間にはなんからの相互作用があり、互いに影響を及ぼす。

Swarm(www.santafe.edu/projects/swarm)[1]も同じ問題意識に基づいて設計されたものである⁵。Swarmはmulti-level programmingが可能なシステムである。システムの単位をswarm（群れ）と呼ぶが各swarmは更に小さいswarmの集団から構成できる（しなくても良い）。上位のswarmに群れに関する制約を書いて下位のswarmを制御することもできるし、上位には何も書かずに下位swarmの集団からの行動創発を用いることもできる。

しかしながら、実際にswarmで書かれた多層システムは今のところ存在しない。やはり、うまくプログラムできないようである。

生物の個体も、構成要素の分子の行動記述だけでは不足で、細胞や内蔵器官の単位の実体の存在が大きい。これらの単位が（構成要素が変化するにもかかわらず）いかにして自分を維持しているかというのはシステム論の大きなテーマであるが、複雑系の研究の中心もこのあたりにあるのではないかと思う。その意味では、swarmのように集団をやはりswarmとし、集団の規則をそこに書くという方法は短絡的な解決であるという気もする。

参考文献

- [1] 知的情報技術と利用の動向に関する調査研究報告書 ー複雑系情報処理に関する調査研究 平成10年3月, (財)日本情報処理開発協会, 1998.

⁵ Langton 1998. 私信。

2. 複雑系の考え方

2. 複雑系の考え方

2.1 複雑系としての（人工）知能

2.1.1 複雑系としての人工知能

橋田 浩一 委員（電子技術総合研究所）

複雑性は、人工知能や認知科学では古典的かつ究極の研究課題である。そこでは、非モジュール性(non-modularity)などを含む複雑性は限定合理性(bounded rationality)に由来する。

複雑性は、対象そのものの性質というよりはむしろ、対象とそれに接する行為者との関係から生ずる。生物やロボットなど、何らかの知能を持つ行為者にとって世界が複雑であるのは、行為者が有限な身体を持ち、また、生存を続けるとか快感を最大化するとかいった、ある意味で際限のない目標を持つからである。競争に勝つには少しでも他者より優位に立つことが望ましいので、同程度の能力を持つ者の間での生存競争から際限のない目標がごく当たり前に発生する。

行為者の身体は有限なので、当然ながら、身体に流入する物質やエネルギーの量、それに応じた身体内での物理的変化、さらに身体から流出する物質やエネルギーの量が制限される。したがって行為者は、自分の目標の達成に関係のある世界の出来事を自分の行為に反映させることがかなり不完全にしかできない。したがって、過大な目標を背負う行為者にとって、自分の手に負えない複雑なものとして世界は立ち現われる。これに対し、限定された条件の下で一定の反応をするという簡単な目標しか持たない、たとえば自動販売機のような機械にとっては、世界は単純である。

行為者は、世界の複雑性に対処するため、世界の物理的事実の詳細をではなく、大局的・抽象的な構造を認識してそれに反応する。たとえば兎が逃げ出すのは、細かい量子力学的状態をではなく狼が忍び寄って来ることを察知するからである。同様に、自動販売機がジュースを出すのはコインの投入を認識するからである。一般にそのような大局的構造を行為者にとっての情報と言う。自動販売機のようなきわめて単純な行為者にとっては、これによって十分単純な世界が得られたことになる。

しかし、際限のない目標を持つ行為者にとっては、情報によって抽象化するだけでは世界は依然として複雑である。その情報は、自分の身体が物理的に限定されているという事情から生じたものだから、無制限に複製を作ったり無限の速度で変換したりできる理想化された情報ではない。行為者による情報処理は、忘却や思い違いを含む不完全なものである。したがってその行為は、行為者の目標に照らして完全に合理的なものとはなり得ない。これをH. サイモンは限定合理性と言う。限定合理性は、世界が行為者の手に余る複雑性を持つことの言い換えである。

科学理論家から見ても、限定合理性の下では、行為者が完全な合理性を持つ場合に比べて、行為者の振舞いははるかに複雑なものとなる。行為や知識や推論に関する従来の科学理論は完全な情報処理能力を前提しているが、その前提の下に作られた理論は、

実際の行為者の振舞を十分に近似できないのである。情報処理を部分的にしか行なえない行為者は、重要な情報だけに注意を向けることによって行為を決定する。しかし、情報の重要性を認識するにはそれなりの情報処理が必要であり、その情報処理も一般には部分的にしか行なえない。つまり、重要性を認識するための情報処理を行なうために、すでに重要性を認識している必要がある。こうして重要性の定義は循環を含み、簡単には完結しない。この循環を収束させることによって限定合理性を数学的に定式化しようという試みはまだ成功していない。

完全な合理性に基づく完全な秩序は古典的な科学理論によって説明できるが、限定合理性に基づく不完全な秩序を説明しようとするると理論が複雑化する。ところが、科学理論は人間に理解可能でなくてはならないから、複雑すぎて科学的に説明したり工学的に設計したりできない現象はありうる。このような観点から複雑性を2種に分類することができる。たとえば宇宙ロケットは複雑なシステムではあるが、推進系統や制御系統や生命維持系統などのモジュール(機能単位)に分かれ、各モジュールは他からはほぼ独立に理解および設計することができ、それらを統合することによって全体の理解と設計に達する。このように、複雑だがモジュールに分解できるシステムをモジュール的、ほぼ分解可能、あるいはcomplicatedなシステムなどと言い、モジュールに分解できないものをcomplexなシステムと言うことがある。J. フォーダーは、人間の認知において一般的な推論などを司る中央系はモジュール的でなく、したがって、認知のメカニズムを科学的に理解しようという試みとしての認知科学は不可能であると主張する。

しかしサイモンは、モジュール的なシステムの方がそうでないものよりも進化や成長の過程における安定性ははるかに高いから、自然淘汰を経て生き残っている複雑なシステムはモジュール的であるはずだと言う。知を科学的に解明しようとする研究においてはサイモンのこの見解を作業仮説とせざるを得ない。この観点からは、システムの静的な構造はモジュール的だが、その挙動は非モジュール的な複雑性を持つと考えられる。つまり、フォーダーの言う非モジュール性は静的な構造のレベルに着目することによって解消できるというわけである。

複雑なシステムを科学的に理解しようとする際、能力(competence)と運用(performance)という2つの側面を区別するのが認知科学や人工知能での標準的なアプローチである。能力とは限定合理性を捨象することによって理想化されたシステムの静的な性質であり、運用とは限定合理性の下でのシステムの実際の振舞いである。能力は古典的なアプローチによって説明することができるが、運用はその限りでない。特に理論言語学では、研究対象をあえて能力に限定することにより、大きな成果を上げてきた。人工知能における知識表現の研究も最初は能力に関するものであった。これは、静的な構造に着目することによって非モジュール性を解消しようという、上記の作業仮説に沿ったアプローチと言える。

しかし、1980年代末から理論言語学で用いられるようになった経済性(economy)の概念は運用に属するものと考えられるし、人工知能において1970年代から研究されているデフォルト(default)などの考え方も同様である。これらは一般に非単調性

(nonmonotonicity)の諸側面と考えられるが、非単調性を取り入れた能力理論はもはや運用理論と区別することができず、能力理論とは言えない。これは上記のアプローチが綻びをきたしているということなのだろうか。あるいは、まだ明示的に意識されていない新たな方向がこのアプローチに潜んでいるということなのだろうか。後者の可能性は、能力と運用の区別を越えた所にある。

2.1.2 複雑系としての知能（見方、方法論）

津田 一郎 委員（北海道大学 大学院理学研究科）

（1） 科学における切断と糊付け(Cut and Paste)

自然科学の世界では様々なレベルで切断を設け、対象を切断と分解によって理解するという方法がとられてきた。一例として、主体と客体の切断はデカルトの切断と呼ばれている。この切断により、科学する側、観測する側と対象を分離し、対象を客体化して捉えることが可能になる。

主体を世界を観測するものから、世界とは独立に計算するものと見なす考えも生まれた。その萌芽はバベッジに見られるが、その後チューリング、フォン・ノイマン、ウィーナーらによってこの考えは発展させられたようにみえる。その基盤を与えたのはブールの「思考の法則」であろうと思われる[1]。この計算主体においては、世界はデータとして認識され、数で表現される。主体はそれを加工し処理するプログラムとして考えられた。この考えが人工知能を誘導していったと思われるが、一方で知能を備えるとはどういうことかに関してチューリングはテストを導入し、知能は他者との相互作用において規定される以外にないという考えを示した。ここに、主体と世界の切断から生じた問題が、主体と世界の結合によってしか解決され得ないという実例を見ることができる。この場合の結合は、もはや切り離しては意味のない様相を表わすので、ここでは「糊付け」と呼んでおく[2]。プログラミングの世界においても、プログラム自体をデータとして取り扱い、主体と世界を糊付けされたものとみなしているように思われる。ウィーナーはサイバネティックスの創始によって、主体と世界の糊付けをフィードバックという概念を導入することで実現しようとしたのかもしれない。金子と池上[3]によれば、このような主題は生命の多様性へ向けての探求の中でその重要性が再認識された。この主題は現在、複雑系科学の中心的な課題の一つになりつつあるものである。

脳と心の切断はデカルトの第二の切断と呼んでよいものだろう。この切断が有名な二元論に導く。一方、量子力学の観測理論で現れるフォン・ノイマンの「抽象的自我」は、必ずしもデカルトの第二の切断と同一視されるものではない。抽象的自我の概念は、「自分自身を観測するものは不安定である」という様相を極限まで突き詰めることで発生する概念であるからである。これは、カントールの対角線論法と類似してい

るように思われる。(ホフスタッター[4]、金子・池上[3]、郡司[5][6]を参照せよ)。このように、直接捉えられない超準的なものを理解する有力な方法は、それを＜構成する手続き＞を理解することである。

(2) $1\frac{1}{2}$ 元論

デカルトの切断は心は脳に還元され得ないという意味を持っていた。さらにデカルトは、心の座を脳内の松果体に求め相互作用説（両者は異なるものだが互いに相互作用できるとする説）の基礎をつくった。この相互作用説は最近ではエックルスやポPPERなどの少数の人によって支持されているに過ぎない。他方、現在多くの神経生理学者は脳内の神経活動が心を表現していると考え、創発的一元論の立場をとっている[7]。私は、これとは異なる考え方をしている。

＜一方では、心は脳内の神経活動の直接的な表現ではなく間接的な表現である。他方では、脳がなければ心は存在しない。＞

これは一元論に近いが、純粋な一元論ではなく、また二元論でもない。いわば、 $1\frac{1}{2}$ 元論である。心を知るのに脳内の神経活動の詳細を知ることが必須である。脳を知らずして心は知り得ない。しかし、神経活動そのものは心を暗示しているのであり、そのものが心ではない。ちょうどカントールの対角線論法のように。数え上げられない数は、数え上げられる数があつてはじめてその存在が示される。しかし、数え上げられる数やその集合は、それ自体で数え上げられない数の表現ではない。

このような形で心と脳は糊付けされると仮定しよう。糊付けの実体は、身体性によってもたらされているように思われる。ダマーシオは神経活動がソマティックマーカーと呼ばれる体性感覚の特異な表現によって調整されることで心の多様な様相が現れるとするソマティックマーカー仮説を提案している[8][9]。フリーマンも同様に身体を重視し、行動が多様な論理を生成することで、脳が心を表わすようになるとしている[10]。私は、身体性を彼らとは少し違う形で定義している。

＜身体性とは、脳の内部世界(相互作用が常に直接的であるような局所的な世界)と外部世界(相互作用が常に間接的であるような大域的な世界)の像を整合させることのできるインターフェイスの構築に伴う感覚のことである。インターフェイスの構築には、身体が必要で、体性感覚や行動がそれを保証している。＞

以上見てきたように、近代から現代にいたる科学の系譜の中で、現象理解のために有効に用いられてきた切断の概念がここ数十年の間に見直されてきた。複雑系における心の問題は、切断されたものの糊付けによって行われるであろう。

参考文献

- [1] G. Boole, *An investigation of the laws of thought on which are founded the mathematical theories of logic and probabilities* (Dover Publ., Inc. 1854).
- [2] 津田一郎、「複雑系の脳科学的シナリオ」、”岩波講座「科学/技術と人間」、

- (岩波書店、1999年) 204.
- [3] 金子邦彦、池上高志、「複雑系の生命的シナリオ」(朝倉書店、1998年).
- [4] D. R. ホフスタッター、「ゲーデル、エッシャー、バッハ」(白揚社、1984年).
- [5] 郡司ペギオ幸夫、「観測のパラドックス」、「現代思想」(青土社、1996年9月号) 156.
- [6] 郡司ペギオ幸夫、「生命の様相--縮退するユリイカの構造」、「講座生命'96」(哲学書房、1996年) 77.
- [7] 松本修文 編著「脳と心のバイオフィジックス」(共立出版、1997年).
- [8] A. R. Damasio, "On some functions of the human prefrontal cortex", *Proceedings of New York Academy of Sciences* 769 (1995) 241.
- [9] A. R. Damasio, "The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex", *Philosophical Transaction for Royal Socity of London B* 351 (1996) 1413.
- [10] W. J. Freeman, *Societies of Brains: A study in the neuroscience of love and hate*, (Lawrence Erlbaum, 1995).

2.2 複雑系としてのプログラム

竹内 郁雄 委員 (電気通信大学 電気通信学部)

2.2.1 離散系のもつ複雑さ

プログラムは書くことはもちろん、理解することすら困難である。その困難性は、その昔(多分、20世紀半ばに)数学者たちがよく言った「無限よりも巨大な有限のほうが難しい」という直観によってうまく言い当てられている。巨大な有限群の発見や、四色問題の証明はそのことを裏付けた。

書かれたプログラムはそれ自身では静的な記述でしかないが、それが実際に意味をもつためには、プログラムの解釈系が必要である。プログラムの解釈系は現在のデジタルコンピュータの技術においては、典型的な離散系である。すなわち、手に負えない巨大有限系の素質を完璧に備えている。

カオスがもたらす「複雑系」は、ごく簡単な方程式系から、非常に複雑な振る舞いが発生することから来ている。しかし、この場合、記述もその解釈系も完全な連続系である。あるところまで、解析的手法が成立しながら、突然カントール集合のような、離散と連続のちょうど中間にあるようなものが出現する。

私個人は、いまだにTuring機械の理論から出てくるような、どこにも連続系が関与しない複雑度の理論(たとえば、KolmogorovやBennettの理論)と、カオスのように、基本的に無限精度がないと意味のない、つまり連続系でないと意味のない複雑系の理論とのきちんとした関連を理解していない。同じものの裏と表の関係にすぎないのか、それとも似ているだけで正反対のものか(これ自身が裏と表というのかもしれない)。

しかし、実はTuringは、Turingマシンを超える計算機械をすでに考案していた。彼がO-machineと読んだ、オラクル(神託)メカニズムを内包した計算機械である。これは通常のTuringマシンに、オラクルとオラクルを読み取る装置を付加したものである。たとえば、すべてのプログラム(当然、2進数で符号化できるので、自然数に対応させることができる)の停止性を表す次のようなオラクルを考える。N番目のプログラムが停止する場合は小数点以下N桁目が1、しない場合は0である、0と1の間の数(実数)をオラクルとする。ある大きな番号以上のプログラムは停止しないということもあり得ないので、これは無限小数である。また有理数(循環小数)ということもあり得ない。だから、これはTuringマシンでは計算できない無理数である(複雑度の理論では、知恵の数 Ω と呼ばれる)。

このオラクルがたまたま与えられたとし、そのオラクルを無限精度で読み取るメカニズムが存在すれば、Turingマシンの停止問題は解けることになる。ここでも離散と連続の間の、微妙にして越え難い壁が見え隠れする。もっとも、Turingマシンの限界というのは、かなり厳格に規定されたTuringマシンのメカニズムに起因する。非同期な並列マシンを用意すると、Turingマシンの計算可能性を超えるらしいので、Turingマシンを超えるのは(それが可制御かどうかは別として)実際的にも不可能でないと思わ

れている。

いずれにせよ、連続系が関与していないために、プログラムは眼鏡の倍率をいろいろ変えて観察するという手法が成立しない。プログラムにも、カオスの初期値過敏性とよく似たことがある。たとえば、私の長いプログラミング (特にマイクロプログラミング) の経験では、一番予期しない動作違いを起こすバグは、プログラムの中の(表面上はエラーが検出されない)綴り誤りである。たとえば、レジスタ番号を間違えるとか、runnableBiTとすべきところをそれとニアミスで、かつプログラムの別のところに存在するrunnableTとしてしまうような誤りは、コンパイラやアセンブラではエラーが検出されない。プログラムを一見しても、誤りに気がつきにくい思い込みが印加されてしまうためでもある。しかし、そのような誤りはまったく予想しないような奇妙なプログラムの振る舞いをもたらす。これに対して、アルゴリズムの誤りや、(1とするとところを2にしたような)数値の誤りバグは、常規を逸したような挙動には結び付かない。予想された軌道の範囲からそれほど大きく外れないのである(それが制御の流れに大きな影響を与える場合は別である)。バグ原因の発見に苦勞するのはもちろん前者である。

このようにプログラムの中の書き誤り、つまりバグは、プログラムの挙動に過敏な影響をもたらすが、それはカオスでいう初期値過敏性とは性格が異なるように思われる。相空間の中で軌跡が急速に離れていくというより、まるで違う空間のなかに、つまり、プログラムを書いた本人には、たとえ、バグがあっても、そんな転び方はしないはずだという、まったく予想もしなかった新しい空間に、プログラムの挙動が転がってしまうのである。主観的な物云いであるが、実感としてそうである。

予想しなかったまったく別の空間へ、振る舞いが転がり込んでしまう。これが離散的記述であるプログラムに離散的な解釈系が作用することによってもたらされる本質的な複雑さである。このようなことが起こったときのデバグは、非常に質の悪い逆問題を解くことにほかならない。秩序を壊すのは簡単だが、壊されたものから、秩序を回復するのは(ジグソーパズルの例を出すまでもなく)きわめて困難である。

離散系の問題の難しさは、観察眼鏡の倍率を変える手法がうまく通用しないところにあると述べた。巨大でありながら、それを表す数のLSB(Least Significant Bit)がいつまでも問題の対象になり続ける。その1ビットの差により、答えがyesかnoか簡単に転ぶ。カオスの場合も、それと似ているのだが、その転び方が眼鏡の倍率に依存する。離散系の場合は、眼鏡の倍率に依存しない絶対的な基準がある。たとえば、プログラムが止まるか止まらないか。正しいか、正しくないか。しかし、カオスの場合は、なんだかんだ言っても位相図のようなアナログ感覚のものが書けてしまう。このような私の直観が一般的に受け入れられるものなのかどうか、私には自信がない。

2.2.2 S-S、C-S、S-C、S-C-S

離散系に内在する複雑さを考える前に、一般的な「複雑系」を、少々乱暴な分類に

当てはめてしまおう。

工学では、複雑系という言葉が出現する以前から、複雑性を回避するというのが基本的な方法論であった。つまり、なるべく単純な、つまりシンプルなメカニズムを用いて、効用を得ようとする。その効用自身も単純な言葉で言い表すことができる。たとえば、速く移動する。重いものを持ち上げて移動する、などなど。従来の工学では、単純な記述で書けない効用(目的、目標)はなかった。また、メカニズムも基本的に単純である。つまり、いくら部品が多くなっても、要素還元的であり、設計図面通りにすべての箇所が機能する。ある種の機械(輪転機がその例か?)ではどうして中間にこんな歯車が必要なの? というものがあるようだが、それでもギリギリ、要素還元的である(と、機械屋でない私は)想像する。

これを一言で言えば、単純(S)から、単純(S)を生み出す、S-S型の方法である。コンピュータが出現する前までの工学はすべからくこのタイプであったと言っても言い過ぎではないだろう。

工学のS-S型に対して、物理学に代表される多くの自然科学は、まず複雑な森羅万象があり、つまり、まず複雑系ありきで、それを理解するために人間がいろいろな指標、特性などを抽出し、単純な原理や理論へとマッピングしようとするタイプである。これを、複雑さ(complex)から単純な指標(simple characteristics)を得るという意味で、C-S型と呼ぼう。

宇宙の原理は単純であると信じて、観察される複雑な振る舞いから単純なパラメータや指標を抽出してきた先人の偉大な努力は敬服せざるを得ない。自然科学のみならず、経済学、社会学など、もともと存在している複雑なものの理解を求める学問はすべてそのような方法論に基づいているのだろう。複雑なものを、複雑さを削らないで記述してもなにも嬉しくないからである。人間は複雑なものを複雑なままには理解できないために、CからSへのマッピングの過程で情報が欠落することは避けられないが、それはそれで問題なしとするということも重要なパラダイムであろう。私はこれまでの人工知能をこのC-S型に分類したい。なぜなら、人間の知能という複雑なものを、科学や工学の(それ自身、単純化の権化である)語彙の範囲で理解しようとした試みだからである。

これらの伝統的な方法論に対して、いわゆる複雑系が話題になり始めたことから抬頭してきた方法論が、単純から複雑へ向かう、S-C型である。これは、単純な記述から、複雑なものを生み出すことがメインになる方法論である。人工生命がその典型であろう。単純なモデルから、複雑な挙動が埋まる現象を「発明」し、そのプロセスを実世界のモデリングに重ね合わせるというのが基本だと私は了解している。仮想世界がいくつも生成されるのだろうが、そのような可能性の示唆自身に意義があると考えerわけである。誤解しているかもしれないが、これが、アプリアリの解釈を捨てたところから発想する池上高志氏の主義であろう(Ikegamismと呼ばせていただく)。

S-C型に確固たる哲学があるのかと問い詰められると、私の自信は揺らぐが、面白いのはやはりS-C型である。複雑系の研究会などで、「こんな記述からこんな複雑な、あるいは奇妙な振る舞いが生じた。どうだ、面白いでしょう」みたいな感じの発表は、

評価が真っ二つに別れるかもしれないが、それがS-C型がS-C型である所以だと私は思う。一部の人工生命研究者のように、人工生命の方法論を娯楽や芸術の手段として利用しようするのは、その点を正しく突いている。

ここまで来ると、C-C型はないのだろうかという疑問が生ずる。こじつけた言い方をすれば、これは複雑なものを複雑なまま受け入れようという古代東洋思想に通ずる哲学である。人間は複雑なものを複雑なままで理解することはできないが、理解するという主知的な発想を捨てて、複雑なものをありのまま享受し、それを楽しむという、一種の悟りをもつことができる。これは精神衛生上、人間の真っ当な対応と言える。

このような乱暴な分類でも、ある種の概念整理が可能になる。さて、コンピュータプログラミングに関しては、上のどれにも当てはまらないタイプを割り当てるのが妥当だと私は考える。多少こじつけだが、これがS-C-S型、つまり、単純→複雑→単純というタイプである。外側だけを見ると、単純なものから、単純な(わかりやすい)効用を得るというS-S型なのであるが、途中でC、つまり複雑を経由する。

S-S型、つまり従来の還元的手法の工学では、単純な要素の線形組み合わせ、あるいは制御された組み合わせにより、人間にとってはっきりとわかる単純な効用、特性、指標を得てきた。工学でパラダイムシフトが起こっているとすれば、複雑系を経由して、なおかつ効用を得ようという考えが広まってきたことである。たとえば、マルチエージェントシステムにおいては、個々のエージェントは十分に単純な記述と振る舞いをもつ。それらが多数並列に動くと、振る舞いは制御可能域を超えた複雑さを持ち始める。しかしながら、システム全体から抽出される効用、特性、指標はわかりやすいものをねらう。

S-S型ではなく、わざわざS-C-S型を選ぶメリットはなにか?コンピュータ屋よりも機械系・制御系の人々がむしろ早く熱心に着目したといえる自律分散系においては、生体と同じような意味での複雑な組織体系をつくることによって、生体が特有に持つ自己安定性、自己修復性、自己組織性が得られることを最大のメリットと考えた。たしかに、生体のような複雑系にこれらの機能は「自然に」備わっているように見える。ただし、それが工学的に作り込めるものなのか、驚異的に長い超並列計算としての進化の結果 ---Bennettのいう遅い成長の原理---によってしかもたらされないものなのかどうか、私にはよくわからない。

しかし、マルチエージェントのようなものを持ち出さずとも、S-C-Sはコンピュータプログラミングの誕生とともに発生したと私は考えたい。つまり、コンピュータプログラムの内部的振る舞いはすでに複雑系の資格を十分に有しているのである。

2.2.3 コネクティクス

冒頭にも述べたように、コンピュータプログラムの複雑さは巨大な離散系のもつ複雑さである。しかし、依然としてプログラムに求められるのはプログラムの内部動作の複雑さに比べると圧倒的に単純な効用である。

コンピュータプログラミングが、S-C-S型である端的な例は、たとえば数式処理による積分である。入力も出力もたいいていの場合、それほど大きくないが、計算の途中に出てくる中途半端な式たちの大きさは、文字どおり半端ではない。

コンピュータネットワークはプログラミングの枠組で考えると、なるべく単純な通信プロトコルという要素によって、非均質につながったコンピュータの間の1対1、1対N、N対Nなどの通信(これ自身はわかりやすい単純な効用)を保証しようという広義のプログラミングである。しかし、コンピュータネットワークのダイナミクスはそれこそ複雑系の典型例であり、人間が工学的に生み出した複雑系の真の代表例である。これもS-C-S型の典型である。

プログラミングをわかりやすいものにしようという運動の出発点は、プログラムの内部動作をプログラマから隠蔽してしまおうという発想である。プログラムから、プログラムの内部動作と直接的に結びついているものを、一つ一つ消していく。たとえば、機械語からコンパイラへの移行で内部レジスタを見えなくする、gotoを言語からなくす、などなど。このような方法論は基本的には要素還元主義に基づくものであり、当然のことながら、それなりの成果を上げてきた。また、それで大方の問題が解決してしまうプログラムの類は実は少くない。木構造階層的なプログラミングは今日でもプログラミングの指導原理である。

ところが、プログラムが扱う対象が複雑になればなるほど、要素還元的なものですら、量的な爆発により、事実上、要素還元的でないものになる。私が昔から個人的なルールとしている(根拠のない)量と質の関係式によれば、量が2桁以上、つまり100倍以上違えば、それは質が「一つ」違う。プログラムが実現しているシステムにはこの意味で質が一つも二つも違う例がたくさん存在する。扱うデータ量が100倍、速度が100倍異なれば、それは違う質のシステムに脱皮する。

単に量が増えるだけでも、そのような差が出てくるが、一般に、巨大になると同時に、巨大量を扱うためのカギとなる一様性や木構造的階層性が失われることが多い。一様なままであれば、小さなシステムのいわば相似拡大であるから、まだ取り扱いやすい。

私が1990年ごろ、当時の同僚たちとともに提唱したコネクティクス(Connectics、日本語では近傍系理論と呼んでいる)という概念がある。コネクティクス一言で言うと、巨大で複雑なシステムも、それを成り立たせている要素は単純であり、かつ要素間の関係も単純であるが、それが集積すると、ねじれが積層して、要素還元的でないシステムが容易に出現することを表す。重要なのは、積層するねじれが個々の要素や要素間の関係を見てもほとんど見えないことである。つまり、局所を見ても、複雑な全体につながるヒントが見えない。

最も単純な比喻でこのことをはっきりさせよう。位相多様体の概念があるが、これは、近傍系からなる被覆である。たとえば、2次元多様体でいうと、近傍とその周囲の近傍を見るかぎり、球面もドーナツもクラインの壺もみな同じである。つまり局所を見る限り、それらに構造的な差はまったくない。しかし、全体を見るとあきらかに違う構造が出現する。つまり、要素や、要素間の関係だけでは記述できないものが大

局的には存在するのである。

コネクティクスの例題はほかにもたくさんある。先人たちは数理社会学、グループダイナミクス、経済学、オートマタ、人工生命、などなど。コンピュータプログラミングの文脈ではコンピュータネットワークやエージェントプログラミングがコネクティクスそのものである。

それでは、コネクティクスはなにを提唱しているか。それは、全体と要素の中間に関する語彙をもっと増やそうという主張である。我々がなにかを理解するということは、それに対して適切な共通言語を用意するということに(もちろん完全ではないが)ほぼ同義であろう。そう思って思い返すと、我々には巨大な数の要素からなるシステムの理解に必要な語彙があまりにも少ない。

要素還元的にうまくいっているシステムでは、中間階層にいろいろな名前付けや概念付けが行なわれている。つまり、階層的理解が、階層間の大きなギャップなしに達成できている。ところが、いわゆる複雑なシステムを語るために、我々は全体として見た特性を語る語彙と、個々の要素、個々の要素間の関係を語る語彙の2種類しか用意していないことが多い。つまり、関係がねじれながら積層している中間段階について語る語彙をもたない。

複雑なシステムはもとより要素還元的な木構造的階層をもっていない、つまり怪層構造 (heterarchical structure) をもっているのだ、そのようないまい語彙を単純に生み出すことが難しい。しかし、数理社会学では点中心性 (point centrality) とか、クリーク (clique) といった、単純な要素間の関係だけではないもの指す語彙がいくつかある。このようなものに類した言葉をもっとたくさん用意すべきなのだ。

自然科学の発達の初期段階では、原理の探求の前に、博物学のような分類学が存在した。我々は自分たちのもっている方法論の道具がすでに十分なものであるかのような誤解をしているのではないか? 複雑系というこれまでの対象とはレベルの違うものを対象にしようというとき、博物学、分類学といった手法をもう一度見直して、我々の観察眼をもっと研ぎ澄ます必要があるのではないか? これがコネクティクスの主張する一番重要な論点である。

複雑系としてのプログラムの話題から少し話が一般論にそれてしまったが、かなり複雑なプログラムを長年書き続け、最近も2ヵ月半にわたって半徹夜続きで実時間ゴミ集めという、最も難しい類の並行プログラム (第3.2節参照) のデバグをしてきた私としては、プログラミングでこのような語彙をなんとか生み出して、世の中に多少の貢献をしたいと考えている。

2.2.4 プログラミングにおける複雑系

木下 佳樹 委員（電子技術総合研究所）

(1) 構造の科学と複雑系

筆者は、ソフトウェアの開発過程やソフトウェア自身の数理モデルを立てるにあたって数学的構造自身を対象とし、いくつもの数学的構造を扱いつつ、それらの間を渡り歩くような考察が必要だと考えている。本項ではまず、抽象データ型の理論においてそのような考察が必要となった事情を説明する。さらに、多数の構造の間を渡り歩くという点が辻下らの複雑系研究コミュニティでの問題意識と通じるものがあると思われるので、その点について説明する。

ソフトウェアの開発や保守の過程を論じるときに基本となる概念の一つに抽象データ型がある。1970年代末以来、十年以上にわたって抽象データ型の数理科学的定義が議論され、現在、有力となっている定義に、「抽象データ型は準代数構造 (essentially algebraic structure) である」というものがある。これは、等号からなるホーン節 (equational Horn clause) によって定義されるような形式的理論のことだと思ってよい。一般の一階の形式理論よりは随分制限されるが、この定義に従うと、どんな抽象データ型の仕様定義も、必ずモデルを持つことが保証されるのがメリットである。一階の形式理論のクラスを準代数構造よりも広げると、このような性質を持つものがあるのかどうか、知られていない。

以下では、この有力な定義に従って、抽象データ型が準代数構造のことと考えて話をすすめる。もっと一般に、抽象データ型とは一階の、あるいは高階の形式理論だと定義して、以下と同様の議論をしていくために必要な数理科学的理論もないではないが、そのような議論はまだこれからの研究課題というレベルの話になってしまうので、ここでは行わない。

さて、抽象データ型の概念は、1970年代後半に提出されて以来、1990年代初頭にかけての十数年間に、抽象データ型の定義についてのコンセンサスが出来上がってきたが、この間の仕事は、抽象データ型を個々に考察するものが殆どで、複数の抽象データ型を対象として、その間の関連、変換などを調べる仕事はあまりなかった。一方、ソフトウェア開発や保守において問題となる現象は、いわゆるソフトウェアのダイナミクスであり、そこでは多数の抽象データ型の間の変換に関する考察が必要となる。ソフトウェア保守とは、まさにソフトウェアの更改のことを指すのだし、開発法として有名な精製法 (refinement) にしても、抽象データ型を、より具体的なデータ型に変換していく方法だと見なすことができる。そこでは、抽象データ型を個々に考察するだけの古典的理論に留まらず、抽象データ型の間の変換を考察する理論が求められる。

ここで、抽象データ型を準代数構造と見なして対象化することの利点が生まれる。我々は既に準代数構造 S, T の間の変換 $\tau: S \rightarrow T$ 、さらにその変換を用いた準代数構造の間の「移り歩き」、つまり τ によって、 T のモデルが S のどのようなモデルに移

るか、などに関する一般論を得ている。これは F.L. Lawvere による代数構造の理論[6]に始まり、1970年代から80年代にかけて構築されたスケッチ理論[1]によって準代数構造を含む、さらに広範囲の構造に一般化されている。この理論を土台として用いて、抽象データ型の移り変わりの理論を与えることができる。実際に、我々は、この方針に基づいて、精製法に関するモデルを与え[4][3]、さらにその過程で必要となったため、スケッチ理論の一般化を行なった[5]。

一方、辻下徹は、自身が主催した平成10年1月の複雑系札幌研究会において、複雑系を特徴付ける概念をいくつか挙げた[7]。さらに、続く平成11年3月の複雑系札幌研究会では、各講演の基調をなす表題を「複雑系と不定性」とし、不定性とよぶ性質あるいは状況が、複雑系の重要な側面であることを主張している。

不定性は、松野孝一郎や郡司ベギオ幸夫、辻下徹、角田秀一郎らによって、複雑系を特徴付ける概念の一つとして提唱されている概念である。辻下は、圏論におけるコヒーレンスの問題が、この不定性に関連することを主張しており、例えば高次元圏論が、等号（同一性、equality）の不定性を解決する鍵になりうるという趣旨の講演を平成11年3月の複雑系研究会においておこなっている[7]。一方、コヒーレンスの問題は、プログラミングにおける構文と意味の關係に深く関連していることを Turi、筆者などが独立に指摘しており、例えば NBE (normalisation by evaluation) などのテーマでこの数年、部分計算や型理論、プログラム意味論などの分野からの興味を集めている[2]。

不定性の一つの側面として、多重記述性というものが考えられている。これは、一つの対象を、いくつかの立場から記述することができ、それらの記述が互いに他を導くようなものではなく、これら多数の記述に主従をつけることも原理的にできない、という状況をいっている。対象の記述に唯一の構造を用いるのではなく、複数の構造を用いることを意味している。一方、ソフトウェアのモデルでは抽象データ型とその実現ということが以前から問題になっている。この現象が直接多重記述性を持つわけではないと思われるが、抽象データ型のモデルでも、多数の数学的構造とその間の変換を用いて現象を記述しているため、我々が抽象データ型を記述するために用いている数理的な道具（代数構造、スケッチなど）が複雑系の多重記述性の研究に関連していると思われる。

(2) 科学技術の外の問題

大野克嗣[8]によると、複雑系は生物学基礎論である、という。「ソフトウェアのライフサイクル」という、ソフトウェア開発論での用語が、ソフトウェアの生き物であるかのように振る舞うと仮定した上で作られているとすれば、複雑系の研究が、ソフトウェア開発に関する考察に役立っても不思議はないわけである。ここでは、人間の心に関する研究から得られた知見が、利用者や開発者までを含めた広義のソフトウェアシステムに対する研究に役立つ可能性を示唆しておきたい。これは、計算機で心を模倣しようとする、いわゆる、古典的人工知能の研究がソフトウェア開発に役立つという意味ではない。もっと方法論的な影響であって、例えば、カウンセリングにおけ

る「聴く」テクニックを、プログラマが顧客から、「何を作るのか」を聴くときに活かすことができる可能性がある、というようなことである。

ソフトウェアの仕様がはっきり決まれば、あとの問題はそれをどのように実現するかであって、これには数理科学を用いた科学技術的方法が大変役立つと思われるし、実際、これまでにかなりの成果を上げている。ところが、ソフトウェアにおいては、仕様を決める過程が、仕様を決めた後の過程に負けず劣らず重要である。

ソフトウェア製作の発注をする顧客は、何を計算機にしてもらいたいのか、自分で言語化できるほどにはハッキリ分かっていないのが普通である。そこで、受注者としては、顧客とのインタビューを通じて、コトバでは明示的に要求されていないが顧客が欲している機能、仕様を言外に読み取ることが大なり小なり要求される。このような読み取りは、20世紀までのいわゆる科学技術の方法だけではうまく説明できないと思われる。ソフトウェアの開発過程を科学的に扱おうとする試みは、いわゆる形式的方法 (formal method) と呼ばれており、これは、「仕様が与えられたと仮定して」、それをいかに実現していくかを論じるものといってよい。仕様の実現だけではなく、仕様を変更したときに何が起こるかの考察も形式的方法の対象のうちにはいるが、いずれにしろ、仕様記述が与えられたとして、そこから出発するのが形式的方法である。現実世界におけるモヤモヤとした要求を言語化し、さらに形式的な仕様を記述するという、仕様を得る段階に関する考察は、形式的方法の対象から外れる。

仕様を決める過程に関する「技術」は「要求仕様技術」と名付けられて、ソフトウェア工学において一定の議論があるが、筆者の知る限り、この技術に関して、これまでに科学的な定説は出ていない。いわゆる科学技術の範疇を超えて、倫理や宗教をはじめ、あらゆる立場を許容する広い見地から、仕様決定の技術に関する考察を行なうことは、広い意味でのソフトウェア科学あるいは情報科学にとっての重要な課題であろう。例えば、ユング派などの深層心理学者が伝えるカウンセリングのテクニックを取り入れることによって新たな視点が得られる可能性があるのではないか。カウンセリングについては、ユング派心理学を日本に紹介した河合隼雄の著作があるが、ユング派の人々は、カウンセリングというものが科学と宗教の狭間に位置する、ある意味で科学を超える思考であることを論じている。このことが、複雑系が広義の生命現象を対象とするものあるといわれることと深く繋がっているように筆者には感じられる。

参考文献

- [1] Michael Barr and Charles Wells. *Toposes, Triples and Theories*, Vol.278 of *Grundlagen der mathematischen Wissenschaften*. Springer-Verlag, 1985.
- [2] Olivier Danvy and Peter Dybjer. Preliminary proceedings of the 1998 appsem workshop on normalization by evaluation, nbe'98 (gothenburg, sweden, may 8-9, 1998). Technical Report NS-98-1, BRICS, May 1998.
- [3] Y. Kinoshita and A. J. Power. Data refinement and algebraic structure. ETL Technical Report TR96-2, Electrotechnical Laboratory, January 1996.

- [4] Y. Kinoshita and A. J. Power. Lax naturality through enrichment. *Journal of Pure and Applied Algebra*, Vol.112, No.1, pp.53-72, 1996.
- [5] Yoshiki Kinoshita, A. John Power, and Makoto Takeyama. Sketches. *Electric Notes in Theoretical Computer Science*, Vol.6, , 1997.
URL:<http://www.elsevier.nl/locate/entcs/volume6.html>.
- [6] F. William Lawvere. Functorial semantics of algebraic theories. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, Vol.50, pp.869-873, 1963.
- [7] 辻下 徹. 1997-1999年度基盤研究B「形式的方法による複雑系数理の基礎研究」.
<http://fcs.math.sci.hokudai.ac.jp/kaken/index.html>.
- [8] 大野克嗣, 生物学としての「複雑系研究」, 草稿, 1999年3月3日.

2.3 複雑系としてのネットワーク

村上 健一郎 委員 (NTT未来ねっと研究所)

2.3.1 複雑系の様相を見せるインターネット

一口にネットワークといっても世の中にはさまざまなものがある。例えば、社会のネットワーク、経済のネットワーク、生体系のネットワークなど、複雑系という言葉で語られるネットワークは尽きない。そこで、無用な混乱をきたさないように、まず、この議論で対象としているものを明確にしておく。ここでの対象は、ネットワークの中でも、コンピュータや電話のネットワークのような情報通信ネットワークのことであり、特に、インターネットを中心に複雑性との係わりを議論する。本稿において単にネットワークと記述した場合には、インターネットのことを示す。

筆者とネットワークとのかかわりは、かれこれ10数年になろうとしている。それは、ちょうど今のインターネット(Internet)の元祖ARPA Ineternet(アルパインターネット)の時代である。それ以来、筆者はインターネットプロトコルの設計や実装等に係わり、同時にインターネットのオペレーションやデバッグをやってきた。ここでインターネットの振舞いを決めるのはソフトウェアであることに注意していただきたい。コンピュータやルータ(インターネットの交換機のこと)の通信ソフトウェアも、通常のソフトウェアと同じくバグが存在する。しかも、その影響は全ネットワークに及ぶこともある。

特にこの数年はインターネットの振舞いのあやしさが目立っている。ARPA Internetの時代は、どこのコンピュータがどこに接続されているかがわかる程度の大きさであり、コンピュータやルータを個々に調整してネットワークを健全に運用することが可能であった。このころのオペレータやユーザは自分たちがインターネットを制御できるという感覚を持っていた。ところが、インターネットは急激に成長し、1998年1月の時点でホスト数は3000万台、ユーザ数は1億5千万人に達した。現在でもホストやルータの数の指数関数的な増加が続いており、インターネットを構成している装置を個々に調整することは不可能になっている。そして、システムは複雑系の様相を示すようになっていく。これは、電話や公衆パケットネットワークと明らかに異なる特性である。

2.3.2 開放系ネットワークとしてのインターネット

インターネットが電話や公衆パケットネットワーク等と違っているのは、そのシステムが開放系になっている点である。ここでの開放系の意味には以下の2つがある。

第一に、システム構成上の開放性である。電話や公衆パケットネットワークでは、ある限られた人だけが全体をながめ、計画的にシステム設計、構成の変更、オペレーションを行っている。また、エンドユーザが勝手に自分の電話ネットワークや公衆パ

ケットネットワークを接続することもできない。ところがインターネットでは、全体を管理する組織もネットワークのすべてを制御できる中心のオペレータもおらず、各組織が自由に接続を行う。そこでの計画性は無いに等しく、問題が発生すれば各参加組織のオペレータが連絡を取り合って試行錯誤による調整を行う。例えば、イーサネットをインターネットに追加するのは5分とかからないだろう。しかし、それが過負荷をもたらしたり、経路情報の破壊という思わぬ副作用を及ぼしても、問題が発覚してそのイーサネットが原因としてつきとめられるまで、誰も止めることもできない。このようにエンドユーザによってネットワークの構成がダイナミックに変えられ、インターネットというシステムは不安定と安定の間をさまよっている。

二番目は、機能上の開放性である。電話や公衆パケットネットワークは、コネクション指向と呼ばれる方式のもので、利用者がネットワークにお伺いをたてて接続してもらう。電話をかけるのはその儀式である。あやしい振舞いをするユーザの場合やネットワークが混んでいる場合には、一方的にネットワーク側、即ち、交換機が接続拒否を行ったり切断を行う。また、話し中の信号を出せばユーザはあきらめて直後の再試行を行うことは少ない。更に、再試行を行ったとしても、疲れるためにその回数には限度がある。そのネットワークの設計モデルはアランに始まる古典的なトラフィック理論にそったものである。呼の発生間隔やサービス時間は指数分布に従うという前提でマルコフモデルを考えてきた。

これに対し、インターネットのほうはコネクションレスと呼ばれる方式で、パケットをネットワークに入れるかどうかは利用者のコンピュータのほうで判断する。ネットワークはそれを止められない。個々のコンピュータは、通信中に継続的にネットワークの負荷を予測し、パケットの転送レートを調整する。しかし、この予想が外れた場合や、予想のアルゴリズム自体の精度が低い場合には、コンピュータは負荷におかまいなしにパケットをネットワークを送り出すため、輻輳(過度の負荷で性能が急激に落ちること)が発生する。これを避けるためにネットワーク内のルータはパケットを破棄する。しかし、コンピュータは、通信相手へパケットが到着しない場合には再転送を行うため、これが過度に行われるとネットワーク全体のスループットが極端に落ちる輻輳崩壊(Congestion Collapse)に至る。コンピュータは人間と違って疲れを知らず、パケットが破棄されても何度でも再転送を行い、ネットワークへパケットを注入するからである。そこで、インターネットの研究者は、ネットワークの負荷を予測するための精度のより高いアルゴリズムや、ルータのパケット廃棄アルゴリズムの研究に力を入れてきた。ネットワークの混雑度をコンピュータというネットワークの外側から予測するという問題を解くのは難しく、現在でもその研究は続いている。

筆者はインターネットのオペレータとして、以上の開放性を日常的な"不安定さ"さとしてとらえていた。例えば、インターネットのある部分が不安定になってつながないことはよく経験することである。また、インターネットでは、世界のどこかが常に変化している。ある場所に新たなネットワークが接続されたり、あるネットワークへの経路が突然なくなって到達不能となることも日常的である。これに比較し、これまでの電話などのネットワークはシステムを安定させることを主眼に設計やオペレー

ションが行われてきた。例えば、日常的に電話が不通になるということは電話のネットワークでは通常ありえない。

2.3.3 コネクティクスと自己組織化 - 階層とフィードバック -

これまで述べてきたように、インターネットは不安定性と安定性の間の遷移を日常的に繰り返している。特徴的なのは、不安定さから安定さへの力が常に働いていることである。つまり、ネットワークが不安定になった場合には、オペレータやユーザが問題を発見し問題を解決する。このために安定な状態へ遷移する。ところが、これとは独立に、別のネットワークで問題が発生するために、不安定な状態に遷移する。このように、管理を行っているオペレータやユーザをシステムに含めると、インターネットではあたかも自己組織化が行われているように考えることができる。ある場所ではネットワークが拡張され組織の増殖が起こる。また、ある場所ではネットワークが消滅したり、障害に陥っていたネットワークが回復したりする。このようなダイナミックなインターネットの見方を強めたのは、1990年ごろに電気通信大学の竹内郁雄教授(当時、NTT研究所)が"コネクティクス(Connectics)" (近傍系理論)という事を言い出した時である。

コネクティクスでは、全体は部分の単純な和ではなく、要素還元的な見方では解釈できないシステムが存在すると考える。ただし、全体論とは違い、マクロとミクロの中間にメソスコピックな視点、即ち近傍を導入する。そして、近傍の積層関係が全体を創発していると考ええる。例えば、インターネットにおけるミクロ、メソ、マクロのレベルは、それぞれ、各LAN、接続されたコンピュータを含む各LANの集合体である自律システムAS(Autonomous System)、バックボーンで結合されたインターネット全体ということになる。ここでの近傍は、ASや通信のローカリティーを持っているLANの集合である。なお、ASとは、同一組織が運用管理するネットワーク(LANの集合)であり、インターネット(ネットワークのネットワーク)を構成する単位となっている。各大学や企業等のネットワークがこれに相当する。

上記3つの各階層は相互に依存しており、すべてのコンピュータ間の完全グラフの接続性と全体の資源の有効利用率を最大にするように働く。つまり、各コンピュータやルータは、おのおのが独立したエージェントとして動作し、互いに他者の振舞いを観測したり予測することによって最適制御を行うフィードバック系となっている。

例えば、インターネット全体が単一のネットワークとして健全に動作するために、近傍のルータ間で定期的に経路情報(知識)の交換(どの場所にどのネットワークがあるか)を行う。この場合、パケットが最も早く相手に到着するように各ネットワークへの複数の経路のうち最も近い経路を選択するが、この結果は再度隣接する全部の近傍のルータへ通知されてフィードバックされる。その結果として、知識がインターネット全体で共有される。しかし、これは静的なものではなく、ネットワークの接続性の変動があるたびに変動するダイナミックな知識である。また、各近傍間にフィードバッ

クが発生している。このため、ある回線が切断されたり、不安定になった場合には、別の経路が選択されて最短経路に常に収束する。これは一種の自己修復力があると思えることができる。なお、経路の選択は、最短経路という判断基準だけでなく、経路の安定性も含まれている。一定以上の周期で経路が現われたり消えたりを繰り返す不安定な経路は捨てられる。

一方、コンピュータのほうも、ネットワークの最大スループットが得られるように自律的に動作する。即ち、各コンピュータがネットワークの状態を観測して自分の利用できる速度を予測し、それを転送レートの制御にフィードバックする。このことによって、輻輳が発生せず、しかも、全体の回線の利用率が向上するような制御が行われる。注意しなければならないのは、このプロセスに全部のコンピュータが直接加わるのではなく、ネットワークにおけるパケットの転送状態を判断して間接的に全体のスループットや回線利用率の最適化を行う点である。もし最大のスループットを得ようとしてこれを無視すると、ネットワークに輻輳が発生し、ペナルティとしてルータがパケットを破棄する。その結果、かえってスループットが落ちてしまうため、各コンピュータは全体のスループットと自分のスループットとのバランスを考えながらパケットを送り出す。

但し、上記の方式は極めて不安定とならざるを得ない。なぜならば、インターネットではネットワークの状態を各コンピュータに陽にフィードバックする機構がなく、正確な見積もりができないからである。各コンピュータは通信相手のコンピュータからの応答を見つつ、ネットワークが過負荷になってパケットが捨てられる時点まで徐々に転送レートを増大していき、パケットが捨てられた時点を利用できる最大の速度を越えて輻輳状態に入ったと判断する。そして転送レートを半分に落す。そして、これを動的に繰り返し、常に最大のスループットを得ようとする。まさに、他のエージェントの動きをネットワークの負荷から間接的に推測して自律的に動作するマルチエージェントシステムとなっている。なお、このような転送速度の最適化は経路情報の変更によっても影響される。以上のフィードバックを考えれば、システムの諸特性が非線型性を示すことが予想される。また、トラフィックの発生もランダムではなくなり、これまでのトラフィック理論が適応しにくくなる。

2.3.4 ネットワークのエンジニアリングと複雑系 - 研究への展望 -

さて、いよいよ複雑系とインターネットの関連に目をむけてみる。複雑系と言った場合、カオス、フラクタル、自己組織化、創発等の関連するキーワードが浮かぶが、複雑系の定義自体はさまざまなものがあるようだ。明確に言い切ることはできないが、インターネットと複雑系とを結ぶものとして、上記コネクティクスで考えるインターネットの自己組織化はその一つと考えることができるだろう。エンジニアあるいはオペレータという筆者の立場からすると、複雑系というパラダイムはエンジニアリング、特にネットワークの設計や構築に何らかの役に立つ道具を提供してほしい。複雑系と

してのインターネットを解析して新たなモデルを確立するだけに留まらず、古典的トラフィック理論のように現実の設計の指針になるべきだと考えている。

これまでの世の中の研究では、主にトラフィックという複雑系を解析して新たなトラフィックモデルを得ようとするものが多い。例えば、W. Lelandらは、イーサネットのトラフィックが、自己相似性を持つことを指摘している。これはその後、他の研究者によっても観測されているが、そうではないと指摘する研究者もいる。W. Willingerらは、この自己相似性の原因が各フロー(通信相手との連続的なパケット転送のストリームのこと)がべき分布となっており、その重ね合せによって自己相似性が生み出されているとしているが、はっきりとそれが解明されているわけではない。また、状態により両方の特性を持つという解析結果も高安らの研究で観測されている。筆者は、このような特性は、コンピュータとネットワークとのフィードバック系にも原因があるのではないかと予想している。いずれにしても、古典的トラフィック理論では呼の発生をポアソン分布としているため、このような特性を持つトラフィックに対する取り扱いが難しい。そこで、エンジニアとして設計のための指針を与えてくれる新トラフィック理論が確立されることを願っている。

一方、筆者は、複雑系は複雑系のまま解くという態度も可能ではないかと考えている。つまり、複雑系を創るという立場である。設計の指針がないならば、逆に自己組織化が可能になるような構成制御の仕組みとアルゴリズムを、インターネットを構成するルータやコンピュータに埋め込むことで設計を不要にするということを目指している。システムは分散エージェントによって接続が変更される。これは、計画経済的にすべてを計算して最適制御しようというこれまでのネットワーク設計とはまったく異なり、各エージェントの効用最大化の動きが結果的に全体のネットワークの自己組織化と(準)最適制御を催すというネットワーク設計パラダイムの市場経済化と考えることもできる。そのイメージは、必要な資源、例えば、コンピュータ、回線、ルータを紙ふぶきのごとくばらまけば、自然に相互接続が行われ、風がふくたびに、構成が自動的に(準)最適状態に変更されるというものである。

2.4 複雑系としてのマルチエージェントシステム

出口 弘 委員（京都大学 大学院経済学研究科）

2.4.1 自律的エージェントからなる複雑系

本稿では、自律的なエージェントからなるシステムとして複雑系を扱う。Complexity に対する研究は、常にシステムのフロンティアラインを巡る研究であった。その過程で、かつては、大規模システムの分解や合成が複雑性のテーマであったときもあるし、階層性に注意が集められた時期もあった。プログラムの複雑性や特殊分野では計算複雑性も独立した領域を構成している。ソフトウェアに関する複雑性の議論は、構造化プログラミングから階層性を重視するシステム設計や、オブジェクト指向へと向かったが、これは従来からの複雑系の階層的処理に関する議論と密接に関連して発達したものである。工学から自然科学にまたがる領域では、エントロピーや力学系が大きなトピックであった時期から、ニューロや遺伝アルゴリズム、カオスや非線形性がトピックになり、現在は人工生命や創発性科学がひとつのブームを形成している。

筆者が1986年に博士論文として「複雑系の認識原理と自己組織化」を提出した時点では、統計力学の拡散と発展の意味での複雑系の扱いが流行していた。またもともと多体系のモデルを多く扱っていた物性理論が、その対象を様々なシステムに拡張しようとして始めていた時期でもあった。だが、その背後で人工生命やエージェント指向の複雑系など様々な新しいシステムのアプローチが擡頭してきた時期でもある。

複雑系の歴史は、どのような複雑性が興味の対象となるかの変遷の歴史であり、これは人工知能が常にフロンティアラインの研究であり、確立した領域が固有領域として切り離され専門化されていった歴史と酷似している。

その発展の過程では様々な流行と、問題関心の変遷があった。力学系を用いた複雑系の扱いを見ても、幾つもの流れがある。例えばルネトムのカタストロフィー理論はポアンカレ的な力学系の全域解析をモース多様体の理論を用い行ったものである。この理論は、何十万次元の状態変数を持つ力学系であっても、それがグラジエント系であれば、高々7次元の力学系と微分同相となることを示した点で画期的な仕事であった。しかし、自然界にはグラジエント系で表現される複雑な現象はそれほどポピュラーではなく、その生物学への応用は、アナロジーであり、理論の厳密さに比してリアルワールドグラウンディングに関する部分が貧弱であった。それゆえその応用は一時的なブームに終わってしまった。これに対して、いわゆる散逸構造の理論は、力学系に辿り着くまでに屈折した経路を辿った。物性理論では、熱平衡から離れた領域を扱うのに、線形近似の可能な線形応答領域では揺動散逸定理など、工学的な線形応答理論の物理学的翻案が行われた。これに対し、平衡状態から遠い非線形領域の処理に関し、当初はエントロピーに関連した安定性の議論を構成することが試みられ、過剰エントロピー生成をリアプノフ関数とする安定性理論などが提起された。しかし結局はこれらの領域の自己組織化に関する複雑性は、力学系とその分岐の問題として扱うことが

妥当であることが広く認識されるようになり、その延長で、ソリトン波やカオスなどの議論も行われていった。

このように複雑性の扱いは、時代と問題関心、流行によって大きく異なるアプローチを内包している。その中で問題となるのは、どのような複雑性を、どのような理論や方法で扱い、どのようなリアリティでもって、現実世界と接点を持つことになるかについての見極めである。どれほど理論が厳密でも、現実の解釈の部分が曖昧では、あやふやなアナロジーとしてのコンジェクチャーしか与えられず、現実の解釈をミスリーディングすることがある。更に領域によっては、社会科学のようにそもそも、どのような意味で法則という概念が成立するかに関して、慎重な理論構成を必要とする領域もある。

そこで本稿では我々は、自律的なエージェント集団に関する複雑系の議論と、それ以外の複雑系の議論を区別して、前者の意味での複雑性の議論が、情報処理とどのように本質的に関連するかを論じる。我々が多主体複雑系(Social Complex System or Poly Agent System)と呼んでいるものは前者の意味での複雑系のアプローチである[2,11,18,20,27]。これにはまた人工生命、人工社会やアニマット論、ロボティクスなどの研究領域が含まれる[23]。これに対して後者の複雑系の議論は、古くからのシステムやサイバネティクスの議論に起源を持つもの、物性論モデルの応用によるものなど更に幾つかの潮流が区分できる。これらの知の諸潮流は、歴史的に様々な結節点で相互に影響を与えあい研究プログラム自身が進化してきたものである[24]。本稿では前者の意味で複雑系という概念を扱う。このエージェント指向の多主体複雑系としての複雑系の扱いは、取り敢えず物理的な複雑系の議論とは一線を画することのできる領域を構成している。また現在、これらの領域は急速にその重要性を高めつつある[資料編参照]。そのその上で、この自律的なエージェント集団に対する複雑系とその情報処理に関する議論がどのように結び付くかを論じたい。

2.4.2 情報処理と複雑系

情報処理という観点から見たとき、自律的なマルチエージェントシステムでは、克服すべき多くの問題点がある。これらの問題は、特に社会科学で登場する、エージェント集団で顕著である。

エージェント間の関係モデルとしては、ブラックボードモデルなどの既に古典的となったエージェント間の相互作用モデルは、情報共有など比較的単純なエージェント間の関係しか扱っていない。ロボティクスで扱われるロボカップのようなエージェント間の相互作用も、エージェント間のコンフリクトのレベルはそれほど高くない。その意味で自律的なエージェント集団としての生物集団や、社会的なエージェント集団の扱いは従来それほど情報処理の中心として扱われてこなかった。またその必要性もそれほど意識されていなかった。しかし今日何らかの主体的な活動をするエージェントからなるシステム(多主体複雑系)の活動モデルとその情報処理が大きな課題となり

つつある。

(1) エージェント指向情報処理とスウォーム

自律的エージェントを含むシステムの複雑性を扱う情報処理モデルは、オブジェクト指向の情報処理モデルや、その延長としてのエージェント指向の情報処理モデルと密接に関係する。これらに関しては、古くから研究の進んでいるDAIのモデルやコンカレントプロログなどの処理系や、近年のインターネット上のデータ収集のためのWebロボットなどと言われるエージェントなど様々な研究がある。だがこれらのエージェントは効率的な分散並列処理やネットワーク上のムービングオブジェクトとしての処理を念頭に置いており、我々の上記の意味での多主体複雑系の処理のための情報システムではない。

比較的これに近い領域にMUD Agentのような人間と対話するエージェントの正解がある。これについては、大きな可能性と課題を含むが本稿では取り上げない。

さて我々の意味での自律的エージェント集団に対する情報処理のための専門システムとしては、サンタフェ研究所で開発されたSwarm(スウォーム)が知られている。Swarmの社会科学領域での応用については、ミシガン大学のコーエンやアクセルロード等の協力で事例が蓄えられている[資料編参照]。

このスウォームは、様々なエージェント関連の技法を参考にして開発されたものであり、例えばスタンフォード大学のVDT(Virtual Design Team)のシステムなどが参考にされている。スウォームは、エージェントの活動のビジュアライゼーションをひとつの主要な目的の一つとしており、また階層的複雑性を扱うことが容易であると主張している、だがそれ自体はエージェント指向の複雑系の新しいモデリング手法を提起しているわけではない。このモデリングの手法に関しては、プログラミングの設計技法の問題と、モデルの妥当性、或いは現実世界との接合(Real World Grounding)という二つの問題が区別できる。そこでまず後者の問題について検討しよう。

(2) KISS原理と現実世界との接合

社会科学に於けるエージェント指向シミュレーションは、ミシガン大学のアクセルロード等によって積極的に探究が進められている[*]。アクセルロードらは、この種のシミュレーションによる分析が野放図なモデル化を招かないように、モデルの仮説について、KISS(Keep It Simple and Stupid)原理というものを掲げてモデルの単純化を主張している。理論が厳密でも、ゲーム理論の応用にしばしば見られるような過剰なコンジクチャによって成り立つ政策議論や、結局はパラメータ推定問題になる計量モデルによって可能となる現実世界との接合(Real World Grounding)を越えて、自律的エージェント集団の特質を明らかにしようとするのが、KISS原理に基づいたエージェント指向シミュレーションのアプローチである。これは今日の人工社会シミュレーションなどに比較的受け入れられている方法論である。だがKISS原理に従うだけでは、実際

の社会経済システムやそれに類する複雑さを持ったエージェント間の相互作用についてのモデルを構築することはできない。またKISS原理では状態表現のリッチさも十分考慮されない。

我々はKISS原理を越える、複雑性のアプローチとそのための情報処理という課題を論じる必要がある。それには、KISS原理を越えてより現実的な政策論や問題解決のためのシミュレーションが可能となるような現実世界との接合の方法を模索し必要がある。そのために、ゲーミングシミュレーションによって人間集団のリアルな挙動とシミュレーションを比較する方法や、テストベッド問題を共有化して複数のアプローチでそれを解析するなどの新しい方法論を展開している最中である。

(3) エージェント指向の設計技法とモデル解析

システムの持つ状態複雑性については、システムの階層的切りわけや、オブジェクト指向のシステムモデルが扱うことのできるものである。しかし複雑な状態モデルを持つエージェントが、更に相互に参照しながら自律的に活動するシステムでは、そこでの相互干渉のレベルが高い場合には、従来からのエージェントの数理手法を適用することが難しい。このような場合のシミュレーションの設計技法をどのようにするかは、複雑系の情報処理の大きなテーマである。

オブジェクト指向の技法では、UML (Unified Modeling Language)の規格化が進みつつあるが、その中でもエージェント間の相互作用については十分なモデル化は与えられていない。

それでは、エージェント間の相互作用として何が問題となるのであろうか。まず問題をボトムアップに構成することの困難と、エージェントの相互干渉を扱うことの困難がある。第一の問題であるが、通常のエージェント指向の情報処理では、全体システムを個々のエージェントの挙動からボトムアップに構成して記述しようとする。このようなアプローチは、全体に関する情報や状態空間をアприオリに仮定しないため、モデル記述が一般に難しくなる。例えば、全体としては明らかにマルコフ的な性質をもっている問題であっても、それを個々のエージェントの行為からボトムアップに組み上げようとするとき、個々のエージェントベースでは、他のエージェントの状態変化が見えないので、ノンマルコフとして個々のエージェントの行為の学習モデルを組む必要が生じることさえある。

またボトムアップなアプローチでは、個々のエージェントが異なった活動ルールをもつ等の、ヘテラルキーの仮定が必要となる。これは従来の、合理的意思決定論のモデルでは与えられない視点である。合理的意思決定モデルでは、個々のエージェントは、判で押したように同じ意思決定基準に従った合理的活動をすることが想定されており、そこでは学習や戦略の創発は一部の例外を除いてはあまり議論されない。エージェント指向のアプローチでは、この学習や創発が大きな課題となる。これらの一部は、遺伝アルゴリズムのような分散型の探索手法を用いて議論されている。だが今日更に重要と成るのは、学習のモデルをどのように組み込むかである。エージェントが

経験を強化していく、いわゆる強化学習には、環境同定型と経験強化型のモデルがある。前者の環境同定型のモデルにはQ学習やk同値などがあるが、これらはいずれも学習コストが高い。これに対し後者の経験強化型のモデルにはクラシファイアや確率傾斜法がある。しかしこれらは学習の完全性が保証されないケースが多く、また時間が経過して得られた利得をどのように過去の戦略（代替案選択）に対して配分するかという問題がなかなか解決できない。

エージェント間の相互作用で更に扱いが困難なのが、エージェント間の行為の結果が、自分の代替案の選択のみならず相手の選択にも依存するという意味での意思決定の相互干渉である。このエージェント間の相互干渉には幾つかの分類軸がある。

- (a) まず2者間のダイアディックな相互作用であるか、或いは集団間のミクロマクロフィードバックを伴う相互作用であるかの区別が問題となる。
- (b) 相互作用に於けるエージェント間の相互意思決定が事前調整を必要とする事前干渉型の意思決定なのか、或いは意思決定の結果は相手の選択によって事後的に干渉されるが、意思決定自身はエージェントが独立行うことの出来る事後干渉型かという区別がある。
- (c) 更にエージェントの意思決定の時間的な変化や、継続的な意思決定の動的展開を問題とするか、しないかも大きな課題である。

例えば、2人の戦略型のゲーム記述は、事後干渉型の2人相互作用モデルを1時点モデルとして扱っている。これをn人ゲームに拡張すると、急速にその分析は難しくなる。更にダイナミックな戦略は、展開型のゲームとして分析される。しかしここでAIの歴史を振り返るとすぐわかるように、意思決定の展開木の解析は、少し長い手順の展開を解析しようとするにあつというまに組み合わせ爆発の壁に阻まれる。既存のゲーム理論は余りに単純なケースを扱っているのでその問題に直面しないだけとさえ言い得る。IBMのディープブルーのような能力を持っても、精々単純な2人間のチェスのようなゲームで、しかも膨大な事例ベースを持って勝つことができるのが限界である。

これが、n人というマルチエージェント状況下で時間展開の入るゲーム状況についてこれを理論解析する適当な枠組みはない。

これらに加えてマクロミクロリンクの入るエージェント間の相互作用の解析は更に困難を伴う。このようなマクロミクロリンクを伴うエージェント間の相互干渉型意思決定の一つの典型が、環境問題である。ペットボトルのばい捨てやいわゆる共有地の悲劇問題は、個々が独立に意思決定を行うことができるが、その結果が時間遅れを伴って全体的な環境や共有地の状況変化（悪化）という形で個々のエージェントに跳ね返ってくる。このようなマルチエージェント型の時間変化のある事後干渉型の意思決定問題については、理論研究は極めて不十分である。それゆえエージェント指向シミュレーションによる問題の解析が重要となる。

更に通常経済学で理論的に扱われている、経済取引は2者間或いはマルチエージェント間の意思決定であるが、このような一見自明に見える相互作用も、ボトムアップな観点からは大きな問題を孕む。取引を2つのエージェントが行おうとするとき、買

い手と売り手の間に合意が必要である。これは通常価格均衡問題として、全体としての均衡解の存在については多く議論されている。だが、実際にエージェント指向でボトムアップにこの意思決定のモデル化を行うことは、簡単なオークションモデルなどを除いてはあまり研究が進んでいない。

新古典派的な経済学で扱うアプローチでは、個々のエージェントは、合理性の無知とでも言える仮定が置かれている。ボトムアップ記述を行う自律的エージェントのモデルでは、ルールベースの記述という形で知識を明示的に組み込むことができる。これに対して新古典派のエージェントは、一見ものすごく知的で完全情報であるように見えるが、実際には、知識ベースを持たない合理性というセントラルな基準に従属して同じ行動を取るエージェントの群である。

我々は知的で自律的なエージェントのモデル化の中で、エージェント間の相互作用過程でコンフリクト解消に関する意思決定が継続的になされるようなダイナミクスを構成的に扱う必要がある。そこでは従来のように個々のエージェントが同じ意思決定基準に従うのではなく、学習によって戦略を変化させるような個性あるエージェント集団が、動的に制約充足問題を解いていくようなプロセスの情報処理が必要となる。この最適化という意思決定原理から、制約充足を動的に行う行為にバリエーションのあるエージェント集団という視点の切り替えが必要であり、そのためには、その情報処理モデルにも大きな枠組みの転換が要求される。現在、マルチエージェントの制約充足問題はタブーサーチやGAなど幾つかの技法でアルゴリズムとして解かれてはいるが、マルチエージェントの情報処理の観点からの統合的分析はない。

(4) ルールベースのシステムが扱う複雑性

エージェント指向のシミュレーションでは、エージェントの活動をルールベースで記述し、その学習や進化を扱うことが課題となる。そこではどのような種類の複雑性が課題となるのだろうか。

いわゆる初期値依存の軌道複雑性の概念が、カオス理論などで用いられる。これは初期に近傍にある2点が十分な時間の後に完全に分離する軌道を取るような性質である。だがマルチエージェントのルールベースのダイナミクスでは、これとは性質の異なる、戦略の複雑性が生じる。

まず、初期の状態の摂動のみならず、戦略（活動ルール）の選択に関する摂動がエージェント間の相互作用のあるダイナミクスの中で生じていることに注意する必要がある。これを通常の方程式型のダイナミカルシステムと比較して考えてみよう。ルールベースのダイナミクスで個々のエージェントが用いる戦略が固定されているケースを微分方程式のような固定法則型モデルと比べてみよう。この場合個々のエージェントが持つ行為ルールが参照している条件部分の状態に関し、その行為のダイナミクスの初期値依存性について議論できるだろう。

だがこのような初期の状態の差異に起因する状態摂動とは異なるレベルの不安定性がルールベースのシステムでは特徴的に生じているように見える。そこではプロダク

ションシステム的な意味でのルールの動的選択過程の中で生じるゆらぎが、他者のルール選択に依存する形で引き起こす不確実性が、単純なルールの学習などでは処理できない複雑性をシステムの中に引き起こすことが問題なのである。

この時間の経過の中でのルール、戦略の学習、変動に伴って生じる不確実性は、ルールベースでルールに関する学習、創発のあるシステムで固有に生じる問題である。これは、法則を固定したダイナミカルシステムでは生じない種類の不確実性である。しばしば、ダイナミカルシステムでは、状態摂動に対する安定性、構造変数摂動に対する構造安定性、それに初期値のゆらぎに関するカオス的な軌道の乱雑さを問題とする。しかしルールの選択に関するゆらぎで生じる不確実性は、構造パラメータの摂動に対比することはできるが、その性質はだいぶ異なる。ダイナミカルシステムでの構造パラメータ変動がもたらす構造不安定性は通常分岐理論によって解析されるが、複数のエージェントに関する構造（ルール）の変化が相互依存的に生じるプロセスはこのような手法によっては解析できるめどのないものである。

ルールの選択に関するあらゆる可能性を、意思決定の代替案の選択の可能性を展開木の形で記すことは理論的には可能である。ゲーム理論の展開形による分析はこのような意思決定の木を解析するものである。しかし一般にマルチエージェントの意思決定の展開木を解析し、そこから意味のある解概念を導出しようとすることは、極めて困難である。

経済学ではしばしばこの選択手の展開型のモデルを用いる。この種のモデルはゲーム理論の中で、ますます複雑な形のものが扱われるようになり、様々に解析されている。だがこれは先に述べたように、かつて人工知能が陥った隘路と同じような困難に出会いつつあると言えるだろう。ゲームを記録するオートマタやチューリングマシンを考える必要のあるようなゲーム理論は、どこに向かおうとしているのだろうか。

複雑な代替案選択の可能性の木を枝刈りして強いゲームプログラムを作ろうという人工知能の試みは、ディープブルーのような強いプログラムを産み出したが、それは意思決定理論の勝利と言えるようなものではない。むしろたった二人のゲームでさえも、強いプログラムを作ることが何を意味するかを教えてくれている。

主体的なエージェントは極めて限定された計算能力と情報処理能力しか持たない。そのような主体が行う、意思決定木の探索と代替案選択は自ずと限定されたものとなる。ましてマルチエージェント状況では、複雑な合理的計算によってエージェントが何らかの具体的な戦略を未来に向けて選択できると考えることは難しい。マルチエージェント環境下での、コンティンジェンシー（他者依存の曖昧さ）に基づく複雑性の分析のためには、ルールの摂動、それも初期のみならず中途での他者に依存し、学習プロセスにも依存するルールの摂動がどのように結果に影響するかに関する分析が必要となる。これには、当面エージェント指向のシミュレーションによる解析が最も具体的な分析を得やすい。筆者の研究でもクラシファイアシステムを用いた、共有地問題の解析によって、極めて現実の人間の行動に近い動的特性を持つエージェント指向シミュレーションが可能となることが明らかになっている。

(5) エージェントベースのシステムに対する間接制御

上記のようなルールベースのシステムに対して、我々は何らかの意味での制御概念を導入する必要がある。いわゆるダイナミカルシステムに関しては、従来型のフィードフォワードやフィードバックの制御理論が適用できる。しかしマルチエージェントのルールベースダイナミクスに関しては、従来型の制御理論を適用することは実質上無理がある。これは、エージェントの自律性を前提とする以上、そのエージェント集団に対して、状態可制御性のようにエージェントの内部状態を制御するモデルは、エージェント集団の制御モデルとして相応しくないからである。

これに対して、我々はエージェントの学習特性、或いは創発特性を前提とした間接制御の概念を導入することが可能であると考えている。これはエージェント集団に対する制度的境界条件を制御入力として、エージェント集団が何らかのマクロ特性（マクロ充足条件）を満たすように入力パラメータを調整する制御概念である。このプロセスで、エージェントは、入力に対応して個々の目的を追及する学習、創発活動を行う。その結果としてマクロ充足条件が満たされるように、入力を制御するというものである。

この間接制御概念は、筆者によって提案され、既に幾つかの定式化が試みられると同時に、シミュレーションレベルでの応用が試みられている。

参考文献

- [1] 高木春夫,木嶋恭一,出口 弘,他著:『マルチメディア時代の人間と社会』,日科技連出版(1995)
- [2] 出口弘:「社会科学とポリエージェントシステム」オペレーション・リサーチ,9月号,PP.16-21,OR学会(1997)
- [3] 複雑系の認識原理と自己組織化,東京工業大学総合理工学研究科システム科学専攻博士論文,1986
- [4] 出口弘:分岐型モデルによる社会構造進化のためのデザイン,進化経済学会第2回大会予稿集(1998)
- [5] 出口 弘:「レプリケータダイナミクス型モデルのミクロマクロリンク」、第10回自律分散システム・シンポジウム予稿集、計測自動制御学会, pp.89-94 (1998)
- [6] Hiroshi Deguchi: "MULTI AGENT ECONOMICS AND ITS GAMING SIMULATION", in 『Modeling and Control of National and Regional Economies 1995』 edited by Vlacic et al., pp.269-274, Pergamon Press (1996)
- [7] 出口弘, 国民経済のマルチエージェント・システムとしてのゲーミングシミュレーション、シミュレーション&ゲーミング、Vol.4 No.1,Sep., pp.112-128(1994)
- [8] 出口弘:ゲームプログラミングと社会科学,『ゲームプログラミング』,bit7月号増刊,pp.231-243, 共立出版(1997)
- [9] 新井潔、出口 弘他著:『ゲーミングシミュレーション』,日科技連出版(1998)

- [10] Robert Axelrod, The Complexity of Cooperation - Agent-Based Models of Competition and Collaboration, Princeton University Press (1997)
- [11] Fernando Vega-Redondo: Evolution, Games, and Economics Behaviour, OXFORD UNIVERSITY PRESS (1996)
- [12] 盛山和夫、海野道郎、『秩序問題と社会的ジレンマ』、ハーベスト社 (1991)
- [13] U.Schulz, W. Albers, U. Mueller (Eds.), Social Dilemmas and Cooperation, Springer-Verlag (1994)
- [14] 出口 弘,矢菅智之: 共有地の悲劇に対する人工社会的分析、数理社会学会1998年3月大会報告予稿集 (1998)
- [15] Edited by E. C. Freuder, A. K. Mackworth, Constraint Based Reasoning, MIT Press (1994)
- [16] 特集「制約充足問題の基礎と応用」、人工知能学会誌,Vol.12, No.3,May (1997)
- [17] 出口弘:「多主体複雑系の構造変動と制約充足型モデル」,電子通信技術研究報告,信学技法Vol.97, No.490,PP.41-48 (1998)
- [18] 在間敬子,出口弘:環境ラベリング制度の効果に関する経済モデル分析,進化経済学会第2回大会予稿集 (1998)
- [19] 吉田民人:『情報と自己組織性の理論』、東京大学出版会 (1990)
- [20] 出口弘:「バーチャルエコノミーで迫る経済の「複雑性」」、経済セミナー、No.513, pp.31-38,日本評論社(1997)
- [21] 星野力:『進化論は計算しないとわからない』、共立出版 (1998)
- [22] Hiroshi Deguchi, Agent Based Approach for Social Complex Systems - Management of Constructed Social World - in Toru Ishida (Ed), "Community Computing and Support Systems" LNCS 1519, Springer, 1998., pp.62-77
- [23] 出口弘,多主体複雑系と間接制御, システム／制御／情報, Vol.43, No.5, pp.227-235,1999
- [24] 出口弘, 経済システムのルールベースダイナミクス解析,進化経済学会第3回大会予稿集, 1999
- [25] 出口弘,自己組織化研究の方法論批判 科学革命としての自己組織化,現代思想, VOL.16-1,1988
- [26] 出口弘、複雑系としての経済学から見た経済政策、ESP,pp.62-69,No.5y,経済企画庁,1999

2.5 複雑系としての言語 一言語と複雑系一

佐藤 理史 委員（北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科）

言語（自然言語）と複雑系がどのように関係しているのか、筆者は確固たる考えを持つに至っていない。おそらく、これらが深く関係していることは間違いないであろうが、その関係は、言語というものをどのようなものとして捉えるかに強く依存すると思われる。

言語を文の集合と捉えた場合の言語の複雑さの分類は、チョムスキーの階層(Chomskip hierarchy)としてよく知られている。この階層は、言語を生成する形式文法と、その言語を受理する機械（オートマトンやチューリング機械）の関係をきれいに対応づけているが、それは、文を単なる文字列としてみなす場合に限られる。ここでは、文には伝達する内容（情報あるいは意味）があることを全く無視している。

自然言語は、豊富な語彙を持ち、個々の単語はそれぞれ異なった意味内容を指す。文法は、単語の並びを規定するだけでなく、意味の合成という役割を持つ。これらを含んだ形で、出来る限り巧みに言語を計算機で扱おうとした試みは、80年代の機械翻訳システムに代表される。ここで、我々は、言語の持つ複雑さと巨大ソフトウェアシステムの複雑さの両方に直面するに至った。例えば、京大のMuシステムでは、複雑な言語現象に対応するために、数千の一般的な翻訳規則以外に、膨大な数の単語固有規則が作成され、利用されることになった。これらの規則のほとんどがヒューリスティックな規則であるという事実は、さらに問題を悪化させた。実際、システム開発の後半では、デバック時にシステムの挙動を正しく予想するのは、ほとんど不可能に近く、従来のシステム開発の方法論（還元的手法）の破綻は、明らかであった。

これが一つの契機となり、機械翻訳においては、事例に基づく翻訳(Example-Based Translation)という新しい枠組が生まれた。この枠組の指導原理は、「似ている翻訳例をまねることによって翻訳を実現しよう」というものであるが、これは、2つの意味において従来の還元的手法を放棄するものでもある。第一に、単語の意味から句の意味を構成し、句の意味から文の意味を構成するという要素合成原理の代わりに、アナロジーを基本原理として採用するという意味においてである。第二に、解析モジュール、変換モジュール、生成モジュールといったモジュールを組み合わせることによって機械翻訳システムを実現することをやめるという意味においてである。事例に基づく翻訳は、事例（翻訳例）とアナロジー原理（似ているものをまねる）からあるタスクの実行系を実現できることを示した点に一つの新しさがあった。これは、ある現象を少数の基本的規則として記述するのではなく、膨大な数の個別的規則とその柔軟な適用によって実現するというものである。そこでは、もやは理解容易性（竹内氏の言う単純さ(S)）は求めない[1]。それなりに動くことが全てである¹。このような方法は、現在の機械翻訳の主要な方法の一つとして広く利用されるに至っている。

1 この点から考えて、この方法は、竹内氏のタイプ分けでは、おそらく、CC型に分類されることになると思われる。

言語処理で直面するもう一つの複雑さは、文脈依存性である。単語の意味はそれ自身だけからは決められず、それが現れる文脈を含めた形ではじめて決まるのである。句の意味や文の意味も、同様の文脈依存性を持つ。これは、中島氏のいうところの「多層」に対応する。すなわち、単語、句、文、文章、さらには、その文章が書かれた状況といったものが、それぞれの層を形成する。それぞれの層の間の相互作用のうち、他の層からの影響が文脈依存性であり、他の層への影響が文脈を作り出すことへの寄与である。このような対応を考えれば、言語（テキスト）は、中島氏の言う複雑系に他ならない。しかしながら、言語処理においても、このような相互作用を機械的に実現するうまい方法は残念ながら見つかっていない。

言語を考える上で忘れてはならないことは、言語は情報を伝達する媒体であるということである。音声や画像といった他の媒体に較べて、言語（テキスト）は、情報の伝達媒体・表現媒体として最も汎用性があり、かつ、対応関係が最も直接的である。その点から、言語の持つ複雑さのある部分は、情報の複雑さを反映しているとも考えることもできる。しかし、一方では、テキストそれ自身は情報そのものではなく、あくまでも情報を運ぶ媒体である。テキストから情報を得るためには、かならず、ある種の処理（通常、認識とか理解とか呼ばれる）が必要となる。この点に着目することにより、「情報を処理は不可分である」という考え方が生まれてくる。この考えは、情報を「モノ」として捉え理論化することはできず、処理というフィルターを通してしか見ることができないという主張を含んでいる。

我々の最終的な目標は、知的な処理と呼ばれる情報処理を機械的に実現することである（これは、言語を巧みに操ることを含んでいる）。機械翻訳のここまでの歴史は、従来の還元的手法によってこれを実現することが非常に困難であることを示唆している。実例に基づく翻訳にみられるような、膨大な実例とそれらの柔軟な適用が一つの方向性を示しているような気もするが、それだけでは全く足りない。処理というフィルターを通した形で、情報の理論を展開することはできるのであろうか。それとも、情報そのものに関する何らかの理解が進まないことには、手も足も出ないのであろうか。

参考文献

- [1] 佐藤理史:アナロジーによる機械翻訳. 認知科学モノグラフ4, 共立出版, 1997.

2.6 複雑系としての生命（現象） — 知能も含めた生命現象の捉え方 —

稲吉 宏明 委員（電子技術総合研究所）

本節では「複雑系としての情報処理」を考える際にヒントとなるような「(知能も含めた)生命現象の捉え方」として下記の4項目を順に示す：

- (1) "flow-ism" (「流態主義」) および "mutual manipulation" (「相互操作」)
- (2) "blind-ism" (「盲目主義」)
- (3) "collective reliability" (「集団的信頼性」)
- (4) 振舞いのD/E (=Detectors/Effectors) 依存性

(なお、上記中引用符("...", "...")内は本節筆者(稲吉)の造語であって、今のところ必ずしも一般に普及している用語ではないことをお断りしておく。)

2.6.1 "flow-ism" (「流態主義」) および "mutual manipulation" (「相互操作」)

(1) "flow-ism" (「流態主義」) について

"flow-ism" (「流態主義」) と名付けた概念は、(生命現象を含む)創発現象のややマクロレベルでの観察から得られたものであり、よりミクロレベルでの記述である "blind-ism" (→次小節) とともに創発現象の双肩をになうものと位置付けられる。

具体的内容は次の通り。

自然界では次のような現象が見られる：

「水」が「河川」を流れる……「河川の形状」が「水の流れ」に影響を与え、同時に「水の流れ」が「河川の形状」を変化させる。

即ち図2.6-1に示すように、河川に蛇行した部分があると水流はそれに応じて流れるとともに、河川の形状を徐々に変化させる。このような、「流れ物体＝実際に移動する実体」と「流れ媒体＝流れを通す実体」間の相互作用が創発現象のために重要でありこれに着目すべきである、という主張が"flow-ism"(流態主義／流れ主義)である(図2.6-2)。

流態主義で細胞の情報処理を捉えると次のようになる(図2.6-3)：

「諸分子」が「細胞集団」内を流れる……「各細胞の状態(e.g. 発現中の遺伝子集合)」が「諸分子の流れ(=物質代謝)」に影響を与え、同時に「諸分子の流れ」が「各細胞の状態」を変化させる。ここで図2.6-3の理解を助けるために、生物学的な基礎知識を図2.6-4～図2.6-6で説明する。

<water flow vs. river shape>

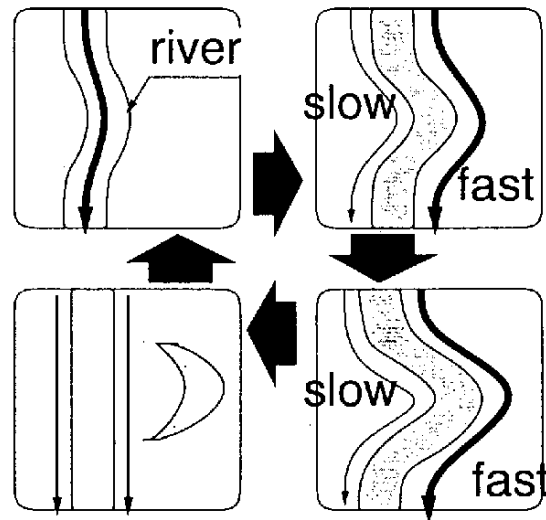


図 2.6-1 「水の流れ」と「河川の形状」間の相互作用

<'Flow-ism'>

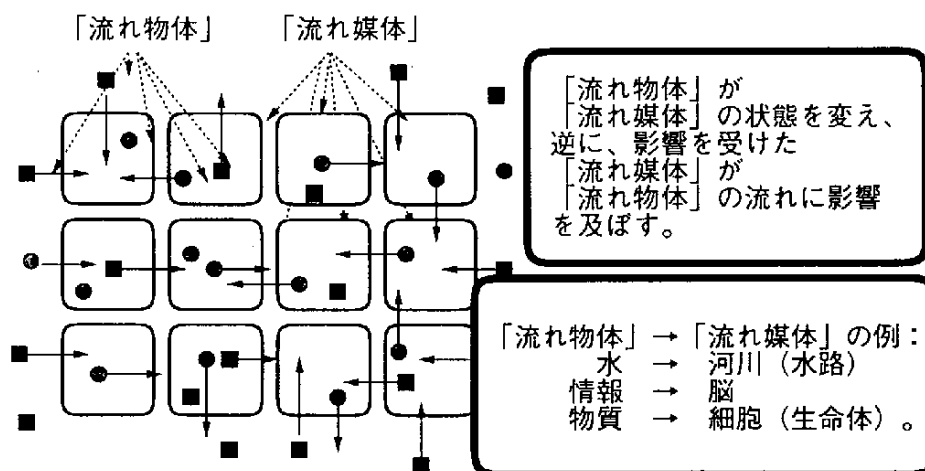


図 2.6-2 "flow-ism"の概念図

まず、図 2.6-4 に示す通り、多細胞生物には個体 → 細胞 → 遺伝子集合(=ゲノム) → 遺伝子という階層構造¹がある。

分化現象は、個体を構成する細胞集団が「共通の遺伝子集合=ゲノム」を持ちながら、各細胞で「利用する遺伝子の集合」即ち「ゲノム中で選択された遺伝子集合(=ゲノムの部分集合)」が異なることに起因する。

遺伝子集合を構成する遺伝子は図 2.6-5 に示す通り、if-then rule と捉えることができ、IF条件が満たされる("ON"状態)と、そのTHEN部分に記述される設計図に基づきその遺伝子産物が生産される(各遺伝子は、{"ON"=遺伝子産物の生産状態、"OFF"=

¹ 個体と細胞の間に「器官」、細胞と遺伝子集合の間に「細胞内器官」の階層を含めた構造がより一般的であるが、ここでは簡略化のため省略した。

<Biological Cell as a machine>

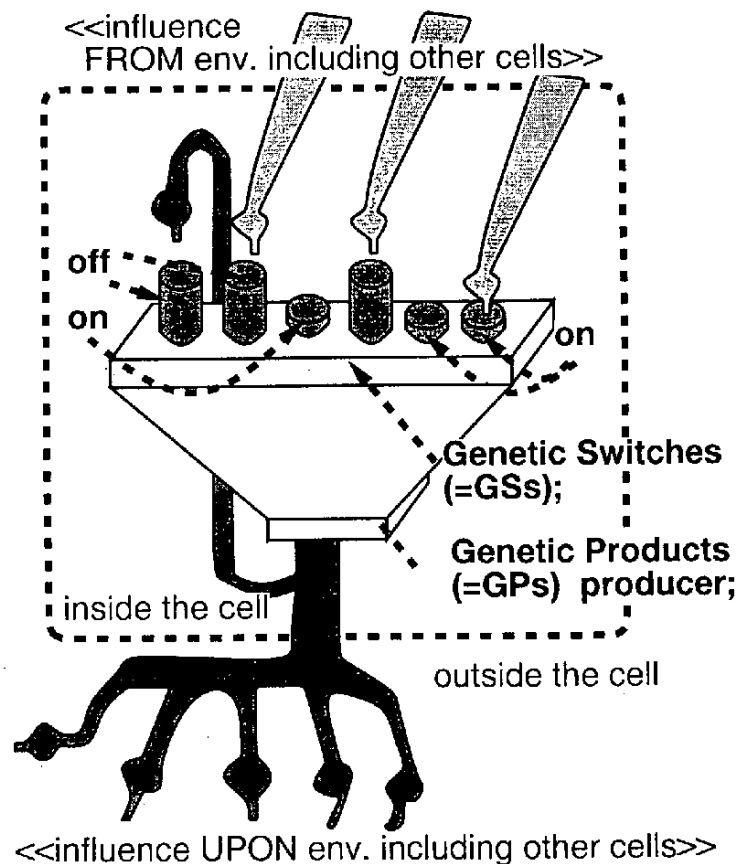


図 2.6-3 流態主義で捉える細胞の情報処理

遺伝子産物の非生産状態} いずれかの状態にある)。

「転写因子」とよばれる一部の遺伝子産物は、他遺伝子のIF条件判定に(正=生産促進 または 負=生産抑制の)影響を与えることが可能である。

そこで、遺伝子を「ノード」で表し、上記の正／負の影響を、「遺伝子間をつなぐ辺」で表せば、「遺伝子ネットワーク」が構築できる(図2.6-6に2遺伝子からなる単純な「相互抑制性の遺伝子ネットワーク」を示す。同図上段の状態は不安定であり、中段または下段に示す状態のいずれかで安定する)。

多細胞生物は図2.6-7に示すように、「共通のゲノム」を持つ細胞集団が遺伝子産物等の「細胞間信号伝達分子」を通じて相互作用している、と見做せる。これを流態主義で捉えると、「細胞間信号伝達分子」が「流れ物体」であり、「ゲノム」が「流れ媒体」に相当する。

「器官形成」がどのように捉えられるかを次に示す：

一般に、腎臓、肝臓、神経系等、各器官において「使用される遺伝子集合」は {他器官と共通の集合} と {その器官のみで使用される集合} に分類され、後者の違いが「器官内外の細胞接着程度の違い」をもたらす。即ち、肝臓細胞同士は「同一コネクタ分子」を有するため接着可能な一方、他器官とは「接着可能なコネクタ分子」を共有しないため、接着しない。

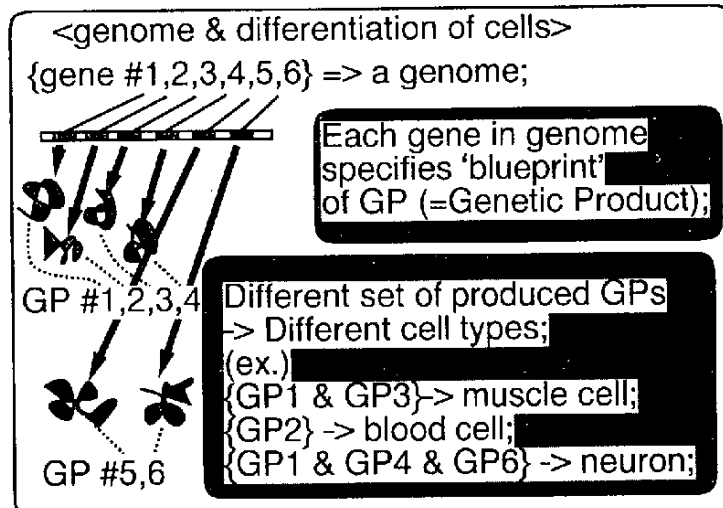
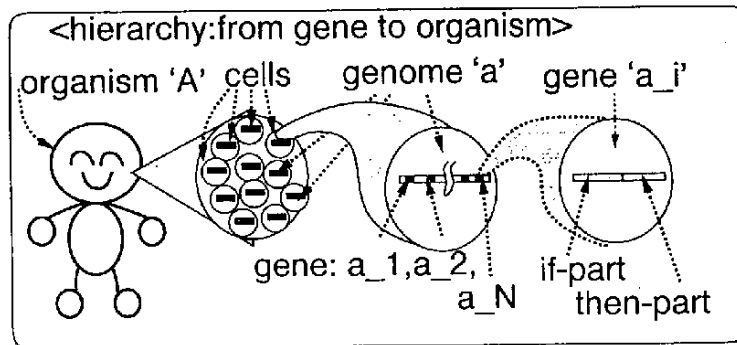


図 2.6-4 多細胞生物の階層構造および分化現象

- ◆ gene={ 'if-part' + 'then-part' }
 - ◆ then-part of gene describes the structure (blueprint) of GP;
 - ◆ if-part of gene specifies which GPs can bind to it;
 - ◆ if-part corresponds to a LOCK, and GP (rep. or activator) corresponds to a KEY;
- GP = Genetic Product.

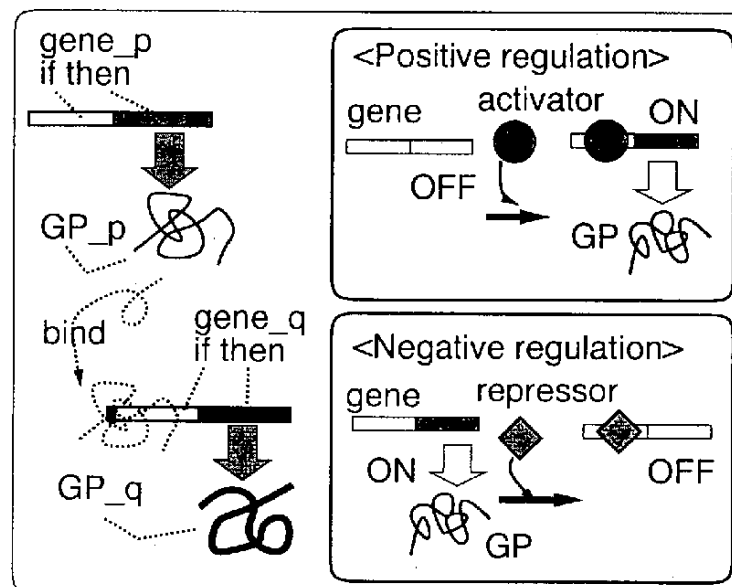


図 2.6-5 if-then ruleとして捉える遺伝子

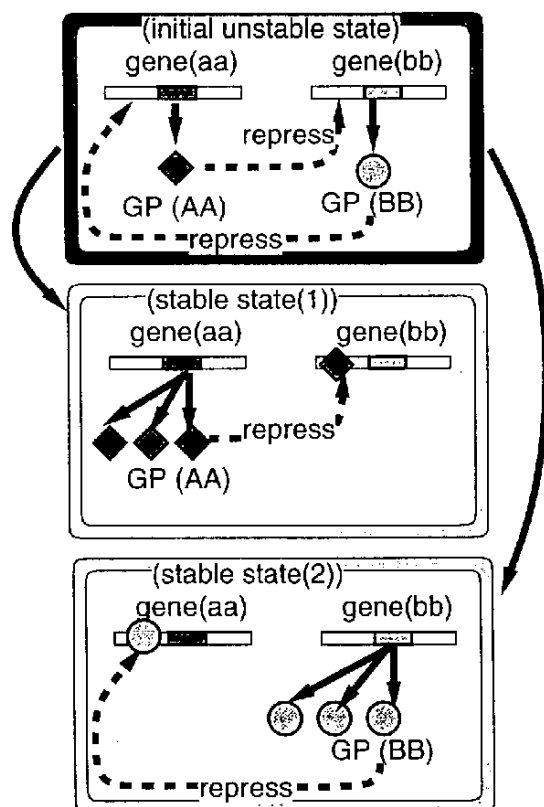


図 2.6-6 2 遺伝子からなる単純な「遺伝子ネットワーク」

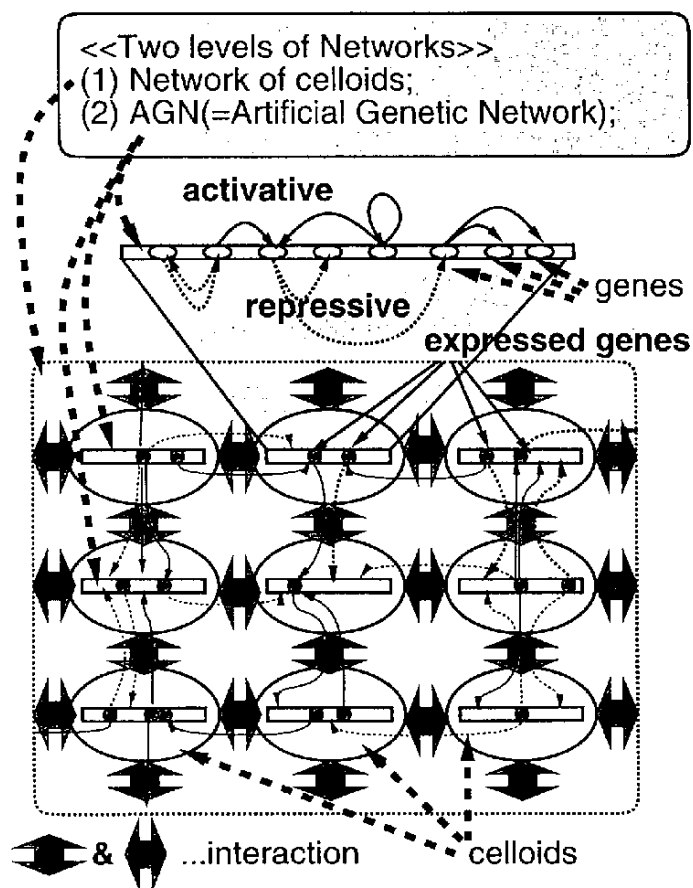


図 2.6-7 共通の「遺伝子ネットワーク(AGN)」を内在する細胞のネットワーク

他方、同一器官内でも、「使用される遺伝子集合」が必ずしも同一ではなく、これにより同一器官内での細胞の「分業」が可能となる。このような「使用される遺伝子集合」の「階層的違い」によって、多細胞生物における細胞集団の分業が実現される。

(2) "mutual manipulation" (「相互操作」)について

上記で、流態主義における「流れ物体＝実際に移動する実体」と「流れ媒体＝流れを通す実体」の間の相互作用の重要性を指摘したが、次に、「流れ物体」&「流れ媒体」間のみならず、多様な場面で見られる"mutual manipulation" (「相互操作」)と名付けた現象を説明する：

最も判り易い例として民主主義国家での「大統領」と「人民」を考えよう。

- 大統領はその権限により人民をある程度統制する、一方で
- 人民は世論を通じて、大統領の諸決定を操る²。

つまり、"mutual manipulation" (「相互操作」)とは、

◎ (2つの手が互いを描く)「手を描く手」のような、あるいは

◎ 「2体の操り人形が互いを操る」ような、現象を指している。

この相互操作しあう2実体の他例としては、前述の

- ◎ {水流 vs 河川形状}
 - ◎ 細胞集団での {相互作用分子 vs ゲノム状態(=各遺伝子のON/OFF分布)}
- のみならず、
- ◎ {個体 vs 環境}
- も含められる。即ち、

- 個体は環境に働きかけることにより環境を操作する、一方で
- 環境は個体の諸決定を操る。

この捉え方により、生物の情報処理においては「因と果が溶け合っている」といえよう(個体のある行動の直接の原因は、その環境にあっても、その「環境になった原因」はその個体にあり、これをさらに遡っていけば … 環境 → 個体 → 環境 → 個体 → … の無限ループとなる)。

² 独裁国家では、このプロセスが無いため、"oneway manipulation"となる。

2.6.2 "blind-ism" (「盲目主義」)

盲目主義 ("blind-ism")とは、簡単にいえば「創発現象が見られる系においては、その系を構成する部品集合中の各部品は《盲目的に》振舞い、非盲目的つまり系全体を見渡して把握しているような部品は存在しない」という主張である(これは、従来既にいわれている「進化の盲目性」に関する概念ではない)。

盲目主義に従うと見做せる典型例のひとつが、神経細胞集団である。神経細胞集団全体としてみると、調和して、脳／神経系の機能が創発されているが、神経細胞個々は、「全体とは無関係に、自分がおかれた局所的環境に《盲目的／機械的に》反応する」に過ぎない。

この「反応規則」が、偶然「細胞集団全体の調和」につながる個体は生存競争で有利になり生き残ったが、神経細胞個々は、「全体の役に立とう」とか「全体を支配しよう」とかの「意図」はない。

生物脳の部品である神経細胞個々は、「各自の持つゲノム(=遺伝子集合がつくるプログラム)」に従い《盲目的に》

- 細胞分裂／細胞死する、
- 軸索を延ばす／壊す、
- シナプスを作る／壊す、
- シナプス重みを増やす／減らす、
- 細胞間伝達物質を放出する、

等の動作をしているにすぎない。どの動作(応答)を行なうかは、

- (1) 細胞外部からの信号(=入力)
- (2) 細胞内部の内部状態
- (3) ゲノム

の3つで決まる。

2.6.3 "collective reliability" (「集団的信頼性」)

神経細胞集団での情報処理を考える。そこでは下記に示すように、「信頼性の低い部品(神経細胞)」を「たくさん」集めることによって「信頼性の高い情報処理」が実現可能となっている：

生物の聴覚神経系においては、ある一定周波数の音刺激に対し"phase lock" とよばれる現象(入力信号の周期的ピークに、応答細胞の発火タイミングが同調する現象)が

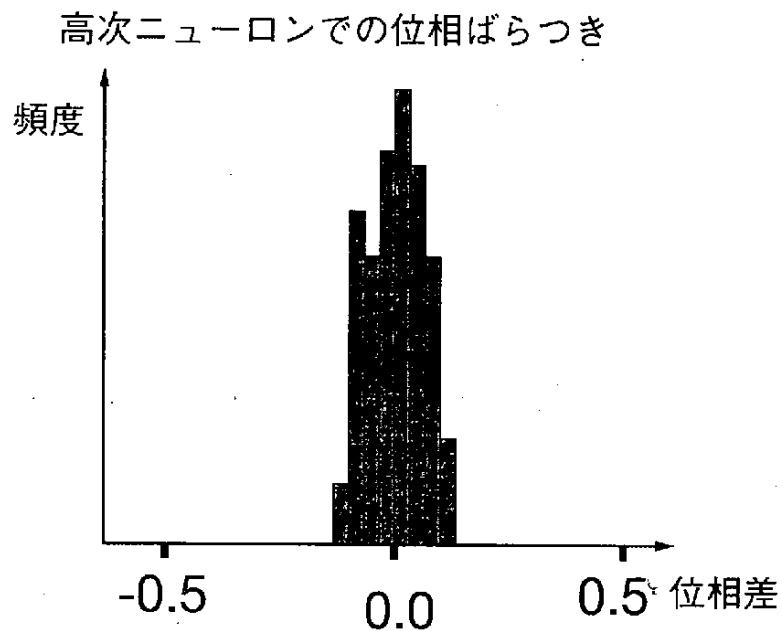
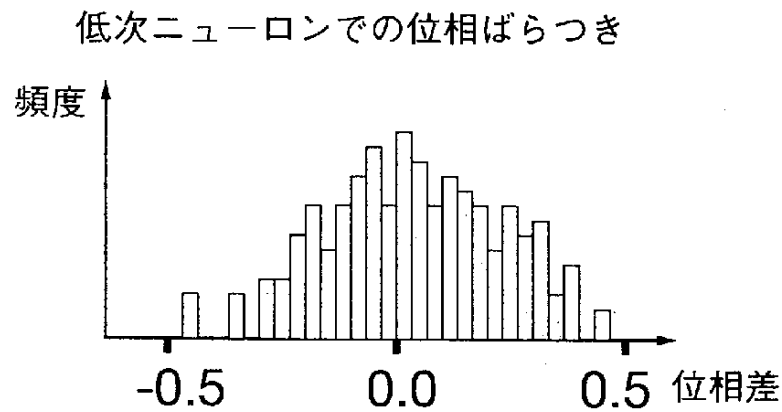


図2.6-8 聴覚神経での「集団的信頼性」

：正確なデータは "Neuron (1998) pp.1237" 参照

起こる。その際に「入力信号の周期的ピークと応答細胞の発火タイミングの間の位相差」を調べると、図2.6-8に示すように、

- 低次(耳に最も近い側)ニューロン集団では位相差のバラツキが大、
だが
- 高次(より脳に近い側)ニューロン集団では位相差のバラツキが小

となっている。

同一音源刺激に対する左右の耳の間の位相差を用いて「音源位置特定」するには、「正確なピーク位相」を左右各々で同定する必要がある。低次の出力情報は「信頼性が低い(=正確なピーク位相に合致している可能性が低い)」のに対し、高次の出力情報は「信頼性が高い(=正確なピーク位相に合致している可能性が高い)」。

高次ニューロン集団の各細胞は低次ニューロン集団中の「複数細胞の同期」を検出

していることが、この現象のからくりである。

これは「個々の部品の信頼性が低くても、集団化することにより高信頼性が実現可能」という、生物が採用した情報処理戦略と捉えられよう。

2.6.4 振舞いのD/E (=Detectors/Effectors) 依存性

思考実験として、「青＝餌(摂取可能)、赤＝致死毒」という世界を考える。形状識別能力のある2種の個体群の一方(A)は色検出能力あり、他方(B)は色盲(「色検出能なし」としよう。

B群にとっては、「形は検出できても、それが致死毒であるか否かは検出不能」であるため、「世界は複雑(≡餌／毒の予測不能)」である。

(B群にとっては、A群の「(色により)毒を見分ける能力」は「超能力」と写るであろうが、B群が亡びて、A群のみとなれば、色検出能力は「常能力」であり、A群にとっては、「世界は単純(≡餌／毒の予測可能)」である。)

さて問題は、上記のアナロジの、「我々が複雑系(≡予測不能系)と捉えている系」への適用可能性、である。我々人間の感覚は一般に「視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚に基づく」といわれているが、「気／第6感／勘／超能力」が、「現時点の科学では検出不能な物理量の検出」に基づくとすると、現状では複雑(予測不能)な現象も、実は予測可能、という事象は否定できないのではないか。

(電気／原子力(放射能)を知らない時に、それらに起因する現象は「超常的」だが、ガイガーカウンタ等の「検出能力」(&制御能力)により非超常的となる。) 以上は検出能(Detectors)についての議論であるが、効果能(Effectors)に関しても類似の議論ができる。(各個体が「超音波発生能」や「X線／ α 線発生能」を有した場合、その個体の振舞い／行動／情報処理は、他条件同一でその効果能を持たない場合と比べて当然変容すると期待できる。)

3. 複雑系の研究事例

3. 複雑系の研究事例

3.1 部分性と複雑性

橋田 浩一 委員（電子技術総合研究所）

3.1.1 記述のレベルと複雑性

古典的な人工知能または認知科学の指導原理である**計算主義**(computationalism)では、知能は3つのレベルから構成されると考える[9][11]。レベル(水準; level)とは記述の粒度であり、レベルが高いとは、より抽象的・巨視的だということを意味する。最も高いレベルは、信念、欲求、意図などの、素朴心理学(folk psychology)の用語で記述できるレベルであり、意味の理解はここで成立する。これを、ピリシン(Z. W. Pylyshyn)は意味レベル(semantic level)と呼ぶ。マー(D. Marr)の言う 計算理論のレベル(level of computational theory) --- 脳が解くべき問題(WHAT)あるいは脳による情報処理の目的(WHY)のレベル --- は意味レベルを含むと考えられる。また、ギブソン(J. J. Gibson)の言うアフォーダンス(affordance) [4]も意味レベルまたは計算理論のレベルにおける事象と思われる。一方、古典的な人工知能のプログラムが携わっている計算は、ピリシンの言う機能レベル(functional level)、つまり、生体の神経系の中に符号化されたデータ構造とそれに対する形式的操作のレベルに属する。これは、マーの言うアルゴリズムのレベル(level of algorithm) --- 脳が計算理論を実行する方法(HOW)に関するレベル --- に対応する。最も低い記述のレベル、すなわち、物理的・生理学的現象のレベルを、ピリシンは物理レベル(physical level)と呼び、マーはハードウェア実装のレベル(level of hardware implementation)と呼ぶ。

このように複数個の記述のレベルを指定するということは、あるレベルに対して抽象化を施した結果としてのより巨視的なレベルを考えるということである。そして、そのような抽象化が必要なのは、世界が**複雑**(complex)だからである。世界が複雑だというのは、認知主体(cognitive agent) --- 生体やロボットなどの自律的な行為者 --- にとって複雑だということである。そしてそれは、認知主体が**部分的**(partial)でありながら、生存を続けるとか快感を最大化するとかいった際限のない目標を持つということである。

認知主体の身体は有限なので、当然ながら、身体に流入する物質やエネルギーの量、それに応じた身体内での物理的変化、さらに身体から流出する物質やエネルギーの量が限定されている。したがって認知主体は、自分の目標の達成に関係のある世界の出来事を自分の行為に反映させることがかなり不完全にしかできない。限定された条件の下で一定の反応をするという簡単な目標しか持たない、たとえば自動販売機のような機械にとっては、世界は単純である。しかし、過大な目標を背負う認知主体には、自分の手に負えない複雑なものとして世界は立ち現われる。

認知主体は、世界の複雑性に対処するため、世界の物理的事実の詳細をではなく、

大局的・抽象的な構造を認識してそれに反応する。たとえば兎が逃げ出すのは、細かい量子力学的状態をではなく狼が忍び寄って来ることを察知するからである。同様に、自動販売機がジュースを出すのはコインの投入を認識するからである。一般にそのような大局的構造を認知主体にとっての情報と言う。要するに、情報が有用なのは部分性のゆえであり、この意味において情報と部分性とは初めから分かちがたく結び付いている。

知能を説明するには、少なくとも物理学のレベルと情報のレベルという、少なくとも2つの記述のレベルに言及せねばならない。これが複数のレベルの由来である。主流の計算主義において3つのレベルを考えているのは、物理レベル(ハードウェア実装のレベル)と意味レベル(計算理論のレベル)とを媒介する説明項として機能レベル(アルゴリズムのレベル)を仮定したということある。それは古来の記号論理学や現在のコンピュータとのアナロジーに基づく仮定であり、論理的な必然性はないが、さしあたり有力な代替案もない。

要するに、情報および情報の概念に基づく計算主義は、世界の複雑性に由来する。世界の複雑性は認知主体の部分性とはほぼ同義であり、この意味において、情報および計算主義の起源は実は身体にある。つまり、計算主義が仮定している複数の記述のレベルや形式的操作などの考え方は、身体を持つゆえに部分的な認知主体が、いかにして世界の複雑性に対処するかに関する工学的要請から導かれる。情報は身体を含む物理的媒体によって担われるが、情報(機能)のレベルにおいては物理学的詳細が捨象される。人工知能は、この情報のレベルにおいて---したがって物理学に還元されない仕方---知を理解しようという非還元論的唯物論(non-reductive materialism)の方法に基づく。この方法が成立し得るのは、認知主体が身体を持ち、ゆえに部分的であるため、認知主体の行動を説明するためにあらゆる物理学的詳細には立ち入る必要がない、という考え方が、検討に値する作業仮説となるからである。身体がなければ情報もなく、その情報という概念に基づく人工知能という企ても成立しない。

しかし人工知能において扱うべき情報(世の中の普通の情報)は、認知主体の部分性に由来するものだから、「純粋な」情報ではない。ここで純粋な情報とは、媒体を選ばず、無制限に複製を作ったり変換したり伝達したりできるという意味において、身体性をまったく持たない情報だが、部分的であるとはそのような無制限の操作が不可能だということなのである。すなわち、情報が実際には物理的媒体によって担われているため、情報のさまざまな処理には時間的・空間的なコストがかかる。したがって、後に少し詳しく述べるように、無限の計算能力を前提する静的な理論をそのまま人工知能で用いることはできない。従来の通常の情報処理技術においては人工知能ほどには部分性が問題にならなかったが、それはシステムの入出力関係を人手による設計の段階で限定しておくことができたからである。

計算主義の公式見解においても、時間的・空間的なコストは重視されており、これは物理的詳細を完全には捨象し尽くしていないということである。物理的詳細のうちで質的な側面は捨象される(たとえば、高分子化合物かシリコンチップかは重要ではない)が、量的な側面は機能レベルに継承される。ところが、それによって生ずる計算量

にまつわる難問はまだ解決からはほど遠い。

以上のように、部分性は、人工知能という研究プログラムを可能にすると同時に、人工知能に対して難問を突き付けてもいる。一般に知能とは部分的な認知主体が複雑な世界に適応する機構と言えようが、その知能を解明しようという試みのうち、この機構を工学的に設計することを手段とするのが人工知能であり、そこでは、物理的詳細を捨象した情報の概念を用いることによって認知主体の部分性を部分的に捉える。これが計算主義である。しかしこの情報は、物理的詳細を捨象し過ぎているために身体性をまったく欠いたものとなっているという意味において、却って部分性を捉えそこねており、そのために人工知能における困難な問題が生じている。部分性を捉えようとして捉えそこねたために生じている問題を解決するには、部分性に関する考察をさらに進めるしかない。以下はそのための試みである。

3.1.2 文脈と多様性

物理的詳細を捨象してもなお、世界は十分複雑であり、認知主体による情報処理もそれに応じて複雑なものとならざるを得ない。その複雑性は文脈(context)の多様性から生ずる。文脈とはさまざまな種類の情報の組み合わせである。たとえば「水ある?」という日本語の文を解釈する際には、言語的情報と非言語的情報が関与するが、言語的情報には音韻的情報や統語的情報などがあり、非言語的情報も、発話が台所でなされているかどうか、話者が花瓶を持っているかどうかなど、さまざまな命題からなる。「発話が台所でなされている」という要素命題を p と書き、「話者が花瓶を持っている」という要素命題を q と書くと、これらによって構成される、 $p \wedge q$ 、 $\neg p$ 、 $p \wedge \neg q \vee \neg p \wedge q$ などのさまざまな複合命題の各々が可能な文脈である。一般に、 n 個の要素命題およびそれらの否定の連言は 2^n 個あり、さらにそれらの選言は 2^{2^n} 個ある。したがって、 n 個の要素命題を認識することができる認知主体にとって、可能な文脈の個数は 2^{2^n} となる。では n はどれほどになるだろうか。人間に認識可能な要素命題は、人間に認識可能な述語(概念)と項(対象)の組み合わせによって構成される。概念の個数は辞書の項目の個数以上だから少なくとも数万のオーダーであろう。対象の個数も同様と考えられる。したがって、要素命題の個数 n は数億以上に及ぶはずであり、文脈の種類の数 2^{2^n} は絶望的に莫大なものとなる。

この議論は、自然言語で記述される記号的情報だけに限った話ではなく、たとえばもっと微視的なレベルにもそのまま妥当する。また、各要素命題や文脈を認知主体が明示的に(何らかの心的表象によって)認識するかどうかにも関係なく成立する。上の議論は、認知主体を外部から見ることによってその認知主体が置かれた環境と認知主体の外面的行動とについて観測される諸命題に関する議論だと考えればよい。その文脈と行動とが認知主体の内部(脳の含む身体)に符号化されているようがいまいが、認知主体とその周りの環境とを合わせた世界の一部において何らかの形で物理的に符号化され処理されているはずであり、そこでは何らかの仕方で文脈の多様性に直面せざる

を得ず、それがいかにして解決されるかに関する説明が求められる。

文脈の種類が上記のようにきわめて多いため、知的なシステムの設計において個別的な文脈ごとにシステムの行動を明示的に指定することは實際上不可能である。(ここで言う「設計」は、人手で与えられたものに限らず、進化や学習によって獲得された構造も含む。)それゆえ、知的なシステムは、設計の複雑性をはるかに越える複雑性を持つ行動を示すという意味での創発性(emergence)を持たねばならない。この意味における創発性を行動に関する創発性(behavioral emergence)と呼ぼう。これに対し、初期設定の複雑性をはるかに越える複雑性を持つ構造が学習や自己組織化によって創出されるという主旨の創発性を構造に関する創発性(structural emergence)と呼ぼう。知的システムの設計はきわめて複雑なものとなりうるから、構造に関する創発性もまた、世界の複雑性に対処するための必要条件である。これら2種類の創発性は互いに深く関連しつつも独立した概念である(しかし、2つの創発性が実際には区別できない可能性もあるだろうが)。すなわち、あるシステムが行動に関する創発性を持ちながら構造に関する創発性を欠く場合も、その逆の場合もあり得る。

以下では主として行動に関する創発性について考えるが、いずれの創発にせよ、知的システムにおける創発は2つの要件を持つ。ひとつは複雑な行動や構造を生成する能力であり、これは当然ながらどのような創発においても要請される。もうひとつは、それらの多様な可能性を評価し、適切なものをそこから選択する能力である。これが必要とされるのは環境に適応するためであり、この意味において、評価と選択の能力は知的システムに特徴的である。次にこうした能力に関して考察しよう。

3.1.3 制 約

一般に、あるシステムの行動を設計するための最も直接的なやり方は、システムがなすべき(運動だけでなく情報処理も含む)行動を各文脈ごとに明記するという設計法である。この設計法は、情報の流れの向きや情報処理の手順を明示するプログラミングであり、そのようなプログラムを手続き(procedure)と言う。極端に明示的に書かれた手続きの大きさは文脈の種類の数と行動の自由度との積に比例するから、これによって人間のような認知主体を設計することは事実上不可能だろう。つまり、手続きプログラムは一度に考慮すべきパラメタが多過ぎるわけである。文脈の範囲を限定することによってそのような手続きプログラムが書けたとしても、そのプログラムはシステムの行動と同程度に複雑なものとなるから、行動に関する創発性が満たされない。

各筋肉に対して個別的に中枢神経系から指令を送ることを想定する運動制御の古典的なモデルは手続きプログラム的一种である。脊椎動物の筋肉は数百にのぼるため、個々の筋肉を別々の自由度として、しかも多様な文脈の下で制御しようとする、運動制御のプログラムはきわめて複雑なものとなり、生理学的モデルとして非現実的だということをベルンシュタイン(N. Bernstein)が指摘しているが、これは、上記の手続きプログラムに関する議論に含まれる。

行動に関する創発性を実現するには、文脈ごとに行動を明記するのではないような設計法が必要となる。文脈や行動を個別的に数え上げるのではなく文脈や行動の抽象的なクラスを組み合わせるような書き方によって手続きプログラムの複雑性を抑制することももちろん可能であり、それが従来の情報処理技術において行なわれてきた通常の方法である。

しかし、ここではもっと徹底的な方法を考えよう。それは、可能な文脈のクラス(および望ましい文脈のクラス)だけを具体的に明示しておくような設計法である。文脈のクラスとは文脈(命題)の選言だから結局は1個の命題となる。この設計法は、文脈(命題)ごとに行動を指定する手続きプログラムに比べてはるかに単純である。文脈のクラスを規定する1個(または2個)だけ命題を記述するこうしたプログラミングの方法を制約プログラミング(constraint programming)と言う。制約(constarint)とは情報処理の手順を捨象した仕様である。手続きプログラミングにおいて各文脈における行動を明示的に指定するということは、多数の(たとえば統語解析をするとか跳び箱を跳ぶとかいう)個別的な作業に対する処理の手順を多くの個別的な手続きとして記述するということだが、制約プログラミングでは多くの個別的な作業をすべてひとつの一般的な手続きに基づいて行なうことになる。

手続きとは文脈から行為を求める陽関数の集合であり、制約とはそれらの陽関数を包摂するひとつの陰関数であるとも言えるだろう。逆に言えば、制約に相当する陰関数をさまざまな文脈に関して陽関数として解いたものの集まりが手続きである。対処すべき文脈の種類が莫大である場合には陽関数の個数も莫大になり、手続きが複雑化する。

手続きプログラミングに比べて制約プログラミングではプログラマの自由度が大幅に少ない。また、手続きプログラミングでは文脈全体を見渡す強力な中央制御機構が必要とされるのに対し、制約プログラミングではそのような機構は不要であり、上記の一般的な手続きを制約の各部分において同時並列的に適用する分散的な制御の方が自然である。ギブソン(J. Gibson)の直接知覚論の流れを汲む研究者たちは、ベルシュタインによる上記の指摘を受けて、中枢の運動制御プログラムから独立して筋肉同士の間で自己組織的に成立する関係が制御の自由度を劇的に圧縮している可能性を指摘している[10]が、これは制約に関するここでの一般的な考察のひとつの具体例になっている。

ここで「制約」の意味について少し補足しておこう。まず、発達や学習に関する研究においては「制約」をある種の生得的な知識という意味で用いることがあったが、ここで言う「制約」にはそのような意味はない。次に、制約にはもともと可能性の制限という意味があり、多様な可能性の評価とそこからの選択という側面が初めから含まれている。制約が制限しているのは世界のありさまに関する可能性であり、制約は、この可能性の範囲内において可能な行動の多様性を最大にする設計なのである。逆に言えば、同程度の複雑性を持つ制約プログラムと手続きプログラムを比べると、制約プログラムの方が格段に多様な行動を生成することができる。さらに、時間的順序を含む知識もまた制約でありうる。たとえば、料理のレシピは作業の時間的手順を含む

知識だが、「後で麺を温め直すから、初めはちょっと硬めにゆでておこう」というような予測(時間の先取り)を含む推論と行為がこの知識に基づいてできるからである。身体的技能も同様の意味において制約と見なしてよい。このように、技能を含む多くの知識を制約と呼んで差し支えないことがわかる。また、制約は認知主体の「頭の中」にあるわけではなく、一般に認知主体とその環境を含む世界の一部にあると考えられるが、これについては後述する。

認知システムが制約に基づいているという作業仮説は、次のような少し異なる観点からも導くことができる。まず、行動に関する創発性を実現するには、ごく少数の種類の情報の間の変換を司る機能要素を多数用意しておき、具体的な各文脈においては、その文脈の中で重要性の高いさまざまな情報に関与するいくつかの機能要素を働かせ、その組み合わせとしてシステム全体の行動を生成するしかない。各機能要素は文脈に関して薄いシステムであるが、それらが文脈に応じて複合することにより、システム全体としては非常に複雑な行動を生成することができるはずである。

このようなシステムは、少なくとも近似的な意味において、制約に基づくシステムとなる。それはこういうことである。まず、上記のような機能要素をひとつ取り上げ、それがたとえばある種類の情報Xを入力として別の種類の情報Yを出力するものとしよう。文脈が十分多様であるとすれば、逆にYを入力してXを出力すべき文脈もあるはずだから、システムはそのための機能要素も含む。3種類以上の情報を扱う機能要素に関しても同様である。しかしそうすると、システム全体としてはきわめて粒度(これは情報論的な粒度であり、物理的な大きさとは無関係である)の小さいレベルにおいてあらゆる方向にわたる情報の流れを許容することになる。これは情報の流れる方向を指定しないということと同じだから、システムの設計はあるレベルで宣言的(この「宣言的」には、言語によって明示的に説明できるという含みはない)な形をしていることになる。この議論は、知的なシステムが厳密な意味で制約に基づく設計を持つことの論理的証明ではもちろんないが、対処可能な文脈の多様性と宣言性の度合との間に正の相関があることを示しており、したがって、知的なシステムの設計が制約に基づいているということが、検討に値する作業仮説であることがわかる。

制約を意味レベルと考えれば、意味レベルが機能レベルから容易には認識できないことが説明できる。制約の下では、異なる文脈に応じて異なる情報処理が行なわれ、文脈の多様性は上記のように莫大であるから、制約に基づく行動の複雑さもそれに応じて莫大なものとなる。したがって、制約に基づく情報処理(機能レベル)は制約自体(意味レベル)に比べてはるかに複雑だから、前者から後者に至るには、非常に多数な抽象化の可能性の中から探索せねばならず、それはきわめて難しい問題になると考えられる。さらに、制約は理論家の頭の中で想定されるだけでなく物理的に実在する、ということを強調しておく必要があるだろう。制約は、(後述のように必ずしも認知主体の「頭の中」にあるとは限らないが)何らかの形で物理的媒体に符号化されている。

フォーダー(J. Fodor) [3]は認知の中央系(central system)がモジュラリティを欠くと言うが、これは、機能レベルにおける現象が複雑過ぎて工学的な設計や科学的な説明が不可能だという主張と考えられる。ただしフォーダーは、中央系がモジュラーでない

ため、これを解明しようとする認知科学は不可能だと言うが、もし制約説が正しいとすれば、解明すべきものは、意味レベルでは制約の内容、機能レベルでは一般的な制約処理手続きということになり、機能レベルにおける非モジュール的な情報処理過程はそれらから導かれる。制約のような意味レベルを考慮せずに機能レベルの複雑な現象を手続きプログラムで明示的に設計または説明しようとするれば、プログラムが複雑化して設計が破綻することになる。

3.1.4 巡回路と対称性

前述のように、ひとつの手続きが多く陽関数の集合であるのに対し、ひとつの制約はひとつの陰関数である。陰関数による情報処理は情報の流れの巡回路による収束計算である。制約の維持は情報の流れの巡回路によって営まれる。制約説においては、こうした巡回路が認知の単位と考えられる。この観点から見れば、認知過程に関してこれまで提案された多くのモデルや理論が制約説に沿うものであることがわかる。

たとえば、[7]による視覚認知の順逆変換モデルでは、2次元画像から3次元の世界を認識する過程を、図3.1-1に示すような巡回路と考える。つまり、2次元画像からまず大雑把な3次元モデルを推定し、それを光学の原理に従って2次元画像に戻すと、もとの2次元画像とずれているので、このずれが小さくなるように3次元モデル調節して行き、ずれが十分小さくなるまでこのサイクルを繰り返すわけである。一般に、脳の中である部位から他の部位への結線がある場合は逆方向の結合もあることが知られているが、これは、このモデルの生理学的根拠であると同時に制約説のひとつの状況証拠でもある。

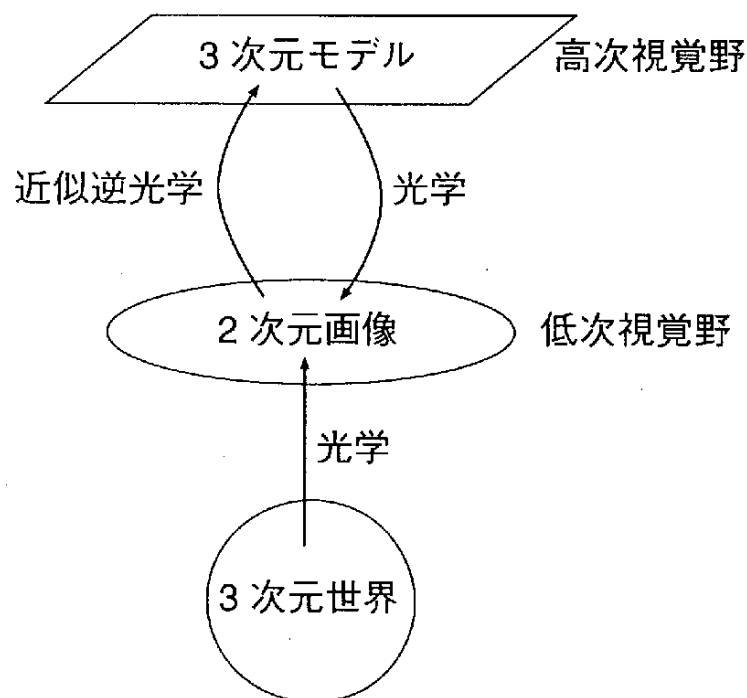


図3.1-1 視覚の順逆変換モデル

巡回路に基づく認知理論としては、他にもたとえば音声知覚の運動説(motor theory)がある。これは、音響の表象と構音運動の表象との間に双方向の情報の流れがあり、音声知覚も構音運動もこの巡回路に基づいて行なわれているという考え方である。たとえば、音声を認識するには、図3.1-2に示すように、聴覚刺激から直接に得られる音響データからそれに対応する構音運動のモデルを推定し、それによって生成されるはずの音と先の音響データを比較し、そのずれが小さくなるように音響と構音運動を修正するサイクルを繰り返すというような、上記の視覚の認識と同様の処理過程が考えられる。発音の際の処理過程は、最初の入力は構音運動のモデルであるが、後は本質的に同じサイクルとなる。ちなみに、言語学の音韻論で広く用いられている弁別索性は構音運動の素性であるが、これは言語音の体系的記述が運動的属性に基づかざるを得ないことを示している。

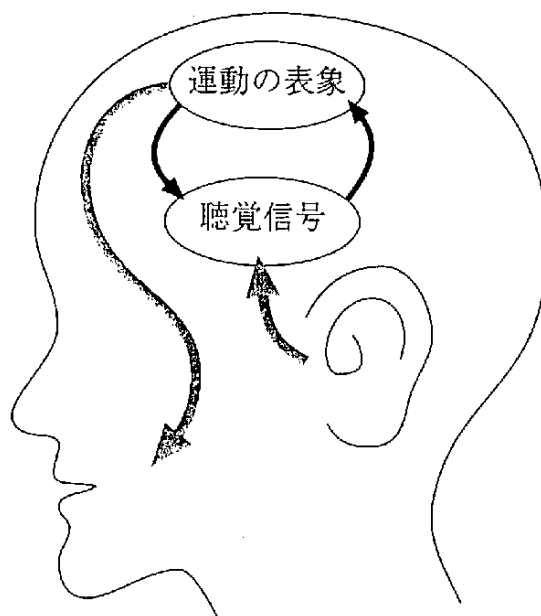


図3.1-2 音声知覚の運動説

認知主体の設計が制約に基づくという仮説を否定する明確な経験的証拠は、これまでのところ知られていない。たとえばブローカ失語症(Broca's aphasia)は、一見したところ制約説に対する反例のようでありながら、実は逆に、制約説を支持するひとつの証拠となる可能性がある。ブローカ失語症とは、ブローカ領域(大脳左半球の前頭葉の一部)およびその周辺の損傷によって生ずる言語障害である。この失語症においては、正しい文を話す能力と書く能力が著しく損われるが、簡単な文を理解する能力は比較的良く保たれる。ブローカ(Paul Broca)が1861年にこの失語症を発見した際の患者は、'tan'としか発話できなかったが、日常会話の理解にはほとんど問題がなかった。それ以来1世紀以上にわたり、これは言語表現を産出する機能における障害だと解釈されてきた。この解釈は制約説に矛盾する。言語表現の理解と産出のための別々の心的プログラムのようなものは存在せず、いずれの作業も共通の一般的な処理手続きによっ

て行なわれるということを制約説は含意するからである。しかしその後の実験では、たとえば'The girl the boy is chasing is tall'のようにある種の統語的な知識が理解に必要な文をブローカ失語症の患者が理解できる割合はあてずっぽうのレベルを越えないことがわかっている(詳しくは[5]などを参照)。したがって、ブローカ失語症は文の産出に関する障害ではない。今後、文の産出における障害に関する研究がさらに進み、ブローカ失語症が産出と理解に関して対称だとわかれば、それは制約説を支持することになる。

3.1.5 環境への埋め込み

人工知能と認知科学の最大の研究課題は、物理的に限定された認知主体が環境に適応するために環境との複雑な相互作用をいかにして行なうかという問いである。にも関わらず、孤立した思惟に基づく問題解決が重視される時期が永らく続いた。これに対して、頭の中での推論よりもむしろ環境との相互作用に重きを置くアプローチが1980年代の中頃から提唱され[1][2][12]、人工知能および認知科学全体としても環境との密接な相互作用---環境への埋め込み---を重視する傾向が定着しつつあるように思われる。以下では、環境への埋め込みという概念が二重の意味で部分性から導かれることを指摘し、環境との密接な相互作用を実現する工学的な方法について考察する。

部分性から環境への埋め込みが導かれるということの第1の意味は制約説に関係する。第3.1.3項で述べたように、多様な行動を生成するためには個別的な文脈ごとにシステム全体の行動を指定する仕方によって環境との相互作用を明示的に設計するのは現実的ではない。したがって、認知主体の設計は制約に基づくものと考えられる。ところが、制約とは情報の流れを捨象した仕様であり、入出力とはシステムの内部と外部との間の情報の流れであるから、制約の中には入出力は現われない。したがって、制約は図3.1-3のようにシステムの内部に格納されているわけではなく、図3.1-4に示したようにシステムと外部環境との関係において成立する。制約に基づくシステムにおいては、システムの内と外を隔てる絶対的な境界は存在しない。

第2の意味は、能力と運用とが区別不可能だという前項での議論に関連する。その議論は、部分性のゆえに完全な情報処理ができない認知主体にとっては完全な情報処理を行なった末に残る情報不足と、情報処理が不完全であるために生ずる情報不足とを区別できず、したがって、能力におけるヒューリスティクスと運用におけるヒューリスティクスとを区別できないというものであった。ある情報がシステム内部での推論によって得られるとすれば、その情報はシステムの内部にあったことになる。一方、システム内部で完璧な推論を行なっても得られないとすれば、その情報はシステムの外部にあったことになる。しかし、部分性によってこの区別は不可能だから、システムの内と外の境界はこの意味においても相対的なものに過ぎない。

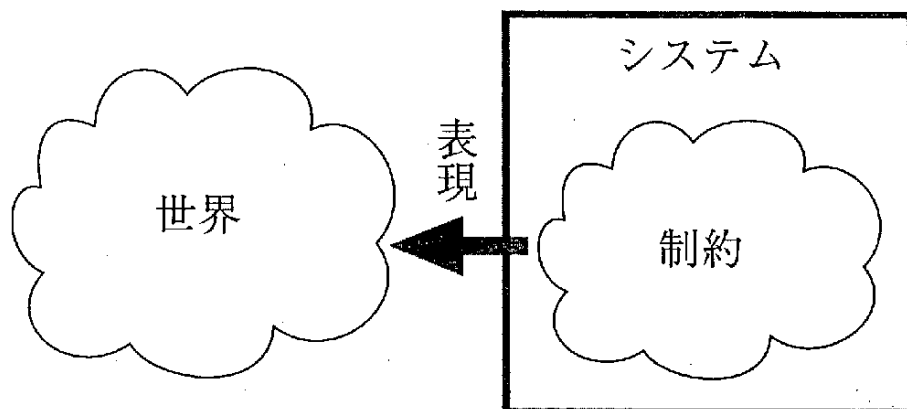


図 3.1-3 システム内部の知識表現としての制約

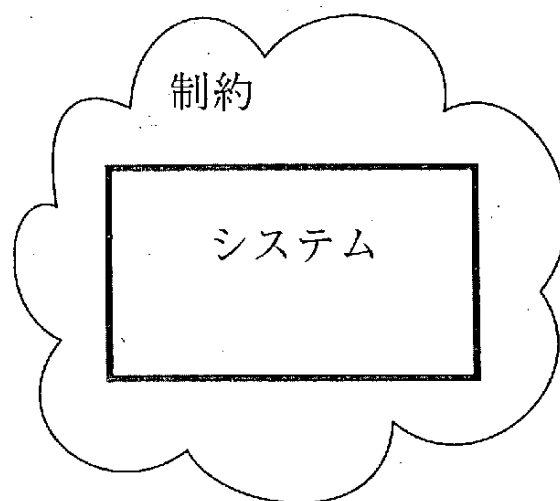


図 3.1-4 システムと環境との関係としての制約

環境への埋め込みを実現した工学的システムの例として、ローゼンシャイン(S. Rosenschein)[12]とブルックス(R. Brooks) [2]のロボットがある。ローゼンシャインは、ロボットとその環境との関係としてロボットの論理的な仕様を与え、これをコンパイルすることによってロボットの内部の論理回路を設計した。また、ブルックスのロボットでは内部のモジュールのそれぞれが環境と直結しており、各モジュールと環境との

相互作用がロボットと環境との間の何らかの制約を維持している。ここで、環境と相互作用するモジュールとしては、常にいずれか1個だけが文脈に応じて選択される。ローゼンシャインのロボットでは制約のうちロボットの内部において担われる部分が固定されているのに対し、ブルックスのロボットではどのモジュールがロボットの動作の制御を握るかが文脈に依存して変化するので、行動に関する創発性がより高いシステムとなっている。ブルックスのロボットにおいては、常に1個の制約だけが部分的にシステムの内部にあって他の制約の維持は環境に委ねられており、制約全体におけるシステムの内外の境界が、モジュールの交替によって変化していると言える。

しかし、これらのロボットはいずれにせよきわめて単純なものであり、行動に関する十分な創発性を持つとは言えない。ブルックスのロボットではモジュールが常に1個だけ働くが、複数のモジュールの動きを同時に組み合わせて多様な行為のパターンを生成することは困難である。また、いずれのロボットにおいても、制約におけるシステムの内外の境界がかなり大きな粒度のレベルで固定されており、行動の多様性が十分ではない。ブルックスのロボットでは上記のようにモジュールの交替によって制約全体におけるシステムの内外の境界が変化するが、各モジュールに対応する各制約において内外の境界が細かく変化することはない。例えば自然言語処理のような組み合わせ的な複雑性の高い作業がこうした設計法によって実現できるとは思えない。

行動の多様性と環境への適応性をさらに向上させるには、粒度の小さな多くの制約の単位を文脈に応じて組み合わせるだけでなく、各制約を実現する情報の流れの巡回路のうちでシステムが担う部分と環境が担う部分の配分をやはり文脈に応じて変化させることが必要だろう。そのための一般的な方法は不明だが、ひとつの可能性として、制約全体の内容が一応システムの内部で符号化されており、各時刻においては、その一部が働いてシステム内の情報の流れを生じ、これが環境における情報の流れと繋がって情報の循環を構成し、これがその時刻における制約を形成する、ということが考えられる。システム内の情報の流れと環境における情報の流れがどこで繋がるかは文脈に依存するわけである。

さらには、図3.1-5に示すように、制約を仮想的に実現するような情報の循環がシステムの内部で常に自律的に生じており、これが随所で環境にアクセスすることによって、システムと環境との間の関係にまつわる制約が維持されると考えることもできるだろう。この図において実際に働いているのは実線で示した巡回路であり、破線の部分は事実上存在しないも同然であることに注意されたい。

環境への埋め込みをいかにして実現するかというのは、情報処理のどの部分をシステムの内部で行なうかということであるから、つまるところは情報処理の制御に関する問題となる。静的な制御はローゼンシャインのロボットの場合のような設計時における事前のコンパイルーションであり、動的な制御はブルックスのロボットの場合のような実行時の選択である。図3.1-5においてどこで入出力を行なうべきかを決定するのも情報処理の動的な制御である。一般に動的な制御は非常に難しい。すなわち、情報処理が部分的にしかできない場合には、最適な意思決定を求めるのが困難である。情報処理における最適な意思決定とは、情報処理のためのさまざまな演算のうちから

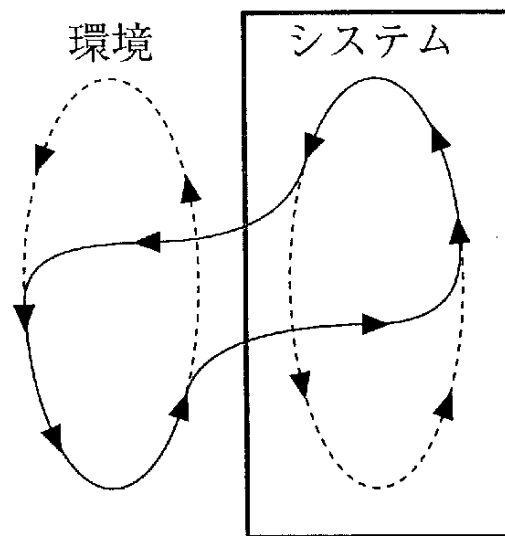


図 3.1-5 システムと環境にわたる情報の巡回路

長い目で見て最も好ましい結果をもたらすものを選択するということである。ところがその選択は、それらの演算を何らかの形で評価した上で最適のものを選ぶという情報処理を含む。そして、その情報処理も複雑なものになり、したがってそこでもやはり最適な演算を選択せねばならないことがありうる。最適な意思決定の定義はこのように循環してしまう。ここで言う「最適」は、情報処理を含む行動が部分的にしか行なえないことを考慮に入れた上での最適性である。実は、その意味での最適性を矛盾なく定義することができ、それに従う最適な意思決定を求めることも原理的にはできる[8]。しかし、それを求めるための計算は認知主体の行動に関連する全情報を参照するきわめて膨大なものとなるから、認知主体が動的にこれを行なうことは不可能である。情報処理の動的な制御に関しては人工知能や意思決定論において永年にわたって研究されてはいるが、体系的な理論はまだない。

3.1.6 不変項と境界条件

複雑なプログラムを設計において有用な概念として不変項(invariant)--- プログラムの実行中に常に成立している条件 --- がある。人間のプログラマにとって直観的に理解しやすい不変項が成立するようにしながら、その不変項に基づいてプログラムの正当性を保証しつつ設計を進めることができる。不変項は、プログラムの内部での一種の境界条件と考えることができる。この不変項の考え方を極端まで推し進めると、全体がひとつの不変項であるようなプログラムが考えられる。これが制約である。制約とはシステムを含む環境における不変項であり、これはアフォードンスの考え方にも通

じる。

過程には直接言及せずにその境界条件だけを明示する設計法は、比較的単純な設計によって複雑な過程を実現することができる。そのひとつの例が制約だが、それはもちろん制約に限らない。制約に基づく設計法を大規模に実用化するには、前述のように情報処理の動的な制御の方法が必要だが、その方法が未熟である段階では、複雑な過程を工学的に実現するのに制約以外の方法を考えるのが現実的である。しかしその方法も、制約と同様に、複雑な過程を許容するような境界条件を与えるものだろう。さまざまな情報処理モジュールに共通の入出力フォーマットを措定することによってモジュールの統合(プラグアンドプレイ)を可能にするというアプローチ[6]はその一例である。

初めに述べたように、情報なるものが有用なのは部分性のゆえであり、この意味において情報と部分性とは初めから分かちがたく結び付いている。情報の概念に基づく人工知能や認知科学という企てを可能にしているのも、情報処理の制御に関する難問を生み出しているのも、ともに部分性なのである。複雑な対象を理解し設計するには、部分性のこの2つの側面を統一的にとらえるような新たな情報の概念が必要となる。それは一朝一夕に成る目標ではないが、境界条件の設計という考え方はその目標につながる有力な手掛かりと考えられる。

参考文献

- [1] Agre, P. A. and Chapman, D. (1991). What are Plans for?, In Maes, P.(ed.), *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology and Back*, pp.17--34. MIT Press.
- [2] Brooks, R.A. (1991). New Approach to Robotics, *Science*, 253, 1227--1232.
- [3] Fodor, J.A. (1983). *The Modularity of Mind*. MIT Press. (伊藤 笏康・信原 幸弘 訳 (1985). 精神のモジュール形式, 産業図書).
- [4] Gibson, J.J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin Company. (古崎 敬 他訳 (1985). 生態学的視覚論, サイエンス社).
- [5] Grodzinsky, Y. (1998). 「統語理論と神経組織 (萩原 裕子 訳)」大津由紀雄・橋田浩一 編, 言語の獲得と喪失 (岩波講座「言語の科学」第10巻), 第3章, 岩波書店, 東京.
- [6] 橋田浩一 (1998). 「意味的修飾に基づく多用途の知的コンテンツ」, 人工知能学会誌, 13 (4), 528--535.
- [7] 川人光男・乾敏郎 (1991). 「視覚皮質の計算理論 --- 再構成からパターン認知記憶まで」*科学*, 61, 214--222.
- [8] Lipman, B.L. (1991). How to Decide How to Decide How to ...: Modeling Limited Rationality, *Econometrica*, 59 (4), 1105--1125.
- [9] Marr, D. (1982). *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. W. H. Freeman and Company. (乾 敏郎・安藤 広志 訳 (1987). ビジョン: 視覚の計算理論と脳内表現, 産業図書).

- [10] 三嶋博之 (1994). 「認識エンジンとしての知覚-行為循環」現代思想, 22-13 (11), 334--343.
- [11] Pylyshyn, Z.W. (1984). *Computation and Cognition: Toward a Foundation for Cognitive Science*. MIT Press, Cambridge, Mass. (信原 幸弘 訳 (1988). 認知科学の計算理論, 産業図書).
- [12] Rosenschein, S. (1987). *Formal Theories of Knowledge in AI and Robotics*, CSLI-87-84, Center for the Study of Language and Information, Stanford University, Stanford, CA. (斎藤 浩文 訳 (1990). 「AIとロボット工学における知識の形式理論」現代思想, 6 (3), 127--139.).

3.2 プログラムの複雑さに関する事例研究—再びプログラミングの現場に戻って—

竹内 郁雄 委員（電気通信大学 電気通信学部）

2.2.1 項に述べたようなスペキュレーションを生み出す源となった、最近の私の実際のプログラミング事例に触れることにしよう。本来プログラムは深く考えて、厳密な証明をしながら行なうべきだという議論がある。まさにこれは正論であるが、大きくて複雑なプログラムでは、そもそも可能なありとあらゆるケースに思い至らないという根本的な誤りもよく起こる。このような状況では、なにかがもっともらしく証明ができて、その証明自身が結局は正しくないわけである。実際に走らせるとその欠陥が現れる。ところが恐いことに、簡単なテストではこういう仕様バグが現象として出ない（発症しない）場合が往々にしてある。

そもそもプログラムを書くという行為は、厳密に規定されたコンピュータの仕様の上で、ある形式的な記述を行なうことである。誤解を恐れずに言えば、プログラムの正当性の証明を行なうことも、まずはプログラムの性質の記述から始めるのだから、その記述自身に誤りが入ることは避けられない。プログラムの性質の記述は、別の形式体系の上で、元は同じものを別の側面から記述することにほかならない。だから、バグが入る可能性に関しては五十歩百歩である。形式体系が優れていれば、実機の上でプログラムの正しさを検証するより本質的に短い時間で、機械的に正当性を証明できる可能性がある。だが、証明したいことの記述自身と、プログラムの記述自身の記述量的な複雑さが、大きなプログラムになるとあまり差がないといった状況が起こる。要するに、仕様バグはプログラムバグと（少なくとも行数に比例して）同じ程度に発生する。

なお、動きが厳密でない、つまり、分布定数回路的ハードバグのあるような、いわば非形式的コンピュータの上でプログラムを書くことはゼロではない。実際、私にとっては、ハードバグのある自家製コンピュータの上でプログラムを書くことが多かったので、これは決してまれではなかった。逆説的だが、そのような場合こそ、プログラムの性質の形式的ないしは非形式的な証明が、ハードウェアバグの箇所を発見するのに貢献した。いわば、プログラムの形式的な記述や証明は、ハードウェアを攻めるためにある!?

プログラミングにおいてフォーマルメソッドを推進している方々にはちょっと申し訳ないが、これでなにかが自動的にできるというより、そのような方法論をプログラミングの現場に浸透させることによって、プログラミングを、行き当たりバッタリのものではない、修練された高度な精神作業にできることのメリットのほうがはるかに大きい。

実際、なんらかの自動的な証明システムが存在しなくても、プログラムの仕様や性質を形式的に書くことは、実際的にも十分な意味がある。同じものを（違う視点で）二重に記述することによって、プログラムの理解を深めることが可能になるからである。同じことを二通りに言い換えて、伝達すべき内容を確実にする人間同士のコミュニケー

ションと同じ手法である。

最近、私の書いたプログラムで、この二重の記述を徹底しなければ、どうにも理解できないし、デバグもできないものがあつた。現在、同僚たちと開発しているTAO/SILENTという実時間記号処理システムの並行ゴミ集め (Garbage Collection、GC) のマイクロプログラムである。

並行プログラミングでは、複数のプロセス (おのこのの逐次プログラムの実行) の進行状態が任意の遅れ進みをする事 (インターリーブ) を前提にしなければならない。逐次プログラムでのプログラムの正しさは、一つのプロセスに対する性質を見ることでだけで調べることができる。ところが、並行プログラムでは、複数のプロセス各々の任意の遅れ進みのどの組合せに対しても、すなわち複数のプロセスのどのようなインターリーブに対しても、プログラム全体としては正しい結果を出すことを証明しなければならない。ほぼ指数的な組合せのすべてに対する検証が必要になる。

だから、よい抽象化が必須である。並行プログラム、なかんずくGCに関して最も有名なプログラムの証明は、Dijkstraらによる並列GCアルゴリズムの提唱とそのエレガントな証明である。正当性の証明を容易にするために、プログラムの効率に関する考慮は一切なされていないが、その後の並列・並行GCに多大な影響を与えた。

我々のTAO/SILENTシステムの実時間GCは、実使用に耐えるシステムとして究極の効率向上をねらつたので、プログラムの証明のしやすさは二の次である。だから、データ構造は複雑だし、多重プロセスの制御のプログラムも複雑である。自然言語でドキュメントを書いても、それで本当に正しく動くのかどうか納得できない程度の複雑さである。

全体で数千行のマイクロプログラムで書かれた並行GCの多くの部分は、並行プログラムであることを特に強く意識しなくても、正しいということが書きながら納得できるものであつたが、いくつかの部分は本質的な難しさを含んでいた。中でも一番難しかったのは、コンスセルというLisp系言語では最も基本的なデータ型の回収 (sweeping または collection) である。通常の一括型GCでは、むしろ最もやさしい部分である。しかし、コンスセルを消費する一般のプロセスと回収を進めるGCプロセスと同じメモリ領域で競合が起こるので、インターリーブによって起き得る状況がとても複雑なのである。これも、究極の効率を考えないコンスセル領域の作り方であれば、実はむしろかなり易しい。

結局、コンスセルを回収しているプロセスからプロセススイッチが起こる場合、すなわち (一般には) コンスセルを消費するプロセスへ制御を渡すところと、中断点から回収を再開するところの計約150行ほどのマイクロプログラムが、ありとあらゆるインターリーブ (この場合は、回収プロセスと消費プロセスの競合) の可能性に対して正しいことを保証するところが最難関であつた。プロセススイッチは実時間性を高めるために、数ステップに1回は起こり得るというプログラムの組み方をしたため、インターリーブの組合せの数は膨大である。

Dijkstraになつた方法論により、いろいろな不変条件 (invariant) を形式的に記述し、それがいかなる場合にも保持されるように、細かな条件を簡単な算術式と不等式を含

んだ論理式で表現し、それをプログラムコーディングに反映させたのであるが、不覚にもこの条件の記述の段階でいくつかの見落としがあった。プログラムが完成した現段階で振り返ると、効率重視のコンスセル領域の構成の複雑さの中で、いろいろな種類のポインタチェーンがあったのに、そのタイプ分けがちょっと粗すぎたことが原因であった。しかし、その粗さに気がつかないかぎり、書かれた論理式にはどこにも場合分けの見落としのような誤りがないのである。実際には、論理式を含んだその部分のプログラムの仕様記述のほうがプログラムの当該部分より長くなってしまった。つまり、記述量に関わる複雑さでは同程度になってしまったのである。

いずれにせよ、仕様記述から機械的にマイクロプログラムを作成したわけではない(マイクロプログラミングはいまだに完全に職人芸の世界である)ので、単純な思い違い的コーディングミスのチェックも兼ねて、実際のテスト走行が重要である。しかし、並行プログラムの実機によるテスト走行は、インターリーブの可能性をなかなか尽くせないで、簡単なテスト走行でOKだからといってプログラムの完成を認定するわけにはいかない。

これは、どこまでテストすれば、プログラム全体が完成したと言えるかという、これまでの長いプログラミング経験に基づいた経験論にかなりの部分を頼らざるを得ない。もちろん、これはすべての論理パスが無事に走ったことを保証するようなパステストを行なった上での話である。

TAO/SILENTのように、外部割り込みや内部時計による割り込みで、非同期的に割り込みが起こってプロセススイッチが起こるようなシステムでは、同じ並行プログラムを走らせても、プロセス数が多いと、まったく再現性がなくなる。TAO/SILENTにはマイクロサイクルカウンタが備わっており、あるプログラムの実行に正確に何サイクル要したかが測定できるのだが、まったく独立の時計で動くDRAMのリフレッシュサイクルなどによる攪乱などがあるので、測定のたびにそういった数値が微妙に異なる。GCと消費プロセスのプロセススイッチのタイミングがそういった小さな攪乱によって小さく揺らされると、それがあたかもカオスの初期値過敏性のように、その後の全プロセスの振る舞いに大きな影響を与えてしまう。

初期に見つかるトリビアルなバグはともかく、上に述べたような仕様バグ、つまり思い違いによるバグの多くは、数十万個~数百万個のプロセスが数時間も走ったあとで突然発症する。しかも、再現しようとする、また数時間かかったりする。もちろん、正確な再現ではなくて、類似の現象の再現という形になる。これがまさに並行プログラムの実行に内在する複雑性なのである。

デバグは基本的には大量の16進(ポストモータム) ダンプを眺めることであるが、やはりそれだけでは足りなくて、要所に要れたダンプ情報を(最大で3万行ほど)眺めるという、およそ根暗の職人作業であった。

GCの大枠の機能はとても簡単である。通常の仮想記憶を記憶空間を実質的に拡大するものとすれば、GCは時間軸方向での仮想記憶、つまり、使い捨てのメモリが無限にあることを保証する技術である。このように簡潔に述べられる機能の実現に、特にデバグの段階でS-C-Sを体験してしまったというのが私の実感である。デバグをCのレベ

ルでしか行なえなかったからである。これをSの段階でやろうというのがフォーマリズムであるが、それがこのような実際的な場面でどこまでうまくいくのか、現在の技術水準ではやはり心許ない。

さて、ここで得られたさまざまな体験を抽象化し、次世代への教訓として残すことが私の責務かと思う。しかし、抽象化してしまうと肝心の泥が落ちてしまい、結局無味乾燥なお説教しか得られない。だが、ここでその詳細を述べることにあまり意味はないだろう。ただ、前のほうでも類似のことを述べたように、プログラムを書くというのは、カオスの基礎方程式を書くのに似ている。係数のちょっとした違いや、プログラムのちょっとした書き違いがもたらす系(プログラム)の挙動の差の大きさには驚かされるものがある。当面はその大きさに対して謙虚になる精神の必要性和、そのような差を生み出した書き違いを発掘することにゲームのような楽しみを見出せるものであることだけはここで強調しておきたい。これは複雑さを楽しむというC-C型の逆転の発想でもあるからだ。

3.3 複雑系としてのネットワーク

村上 健一郎 委員 (NTT未来ねっと研究所)

3.3.1 インターネットは複雑系か？

(1) インターネットの開放性と不安定性

複雑系は、物理学から始まり、社会学、経済学等における複雑な研究対象を理解する考え方としても注目されている。一方、物を作るというのが目的のエンジニアリングでは、要素還元主義を基にしているため、複雑系には違和感を持つ人も少なくない。エンジニアは、システムが設計時に意図した通りに動くことを期待しているのであって、新しい機能が創発されたり、システムの機能が勝手に変わってしまうことは望まない。しかし、場合によっては予期しなかったシステムの不安定な振舞いが断続的に起こることがある。例えば、インターネットは、そのような例である。インターネットは、コンピュータ間の物理的接続が完全グラフでなくとも論理的に全コンピュータが通信できるようにするネットワークの一種であり、その仕組みは、以下のように極めて簡単なものとなっている。

- (a) コンピュータは、あて先を書いたパケットをインターネットに投げ込むだけで良い。
- (b) ネットワーク側のパケット交換機(ルータ)は、世界中のネットワークがどのルータに接続されているかを知っているので、指定されたあて先までの経路上にある隣接するルータに次々とパケットを渡してゆくだけである。このようにバケツリレー方式に中継されたパケットは、最終的に指定されたコンピュータに渡される。なお、ルータは複数の回線で他のルータへ接続されている。
- (c) 各ルータは自分の配下にあるネットワークの番号情報(IPアドレス)を相互に交換しあう。従って、結局、全部のルータが世界中のネットワークについての知識(どの番号を持つネットワークが世界のどこに接続されているかを示す経路情報)を持つことになる。

上記のような簡単なパケットの中継アルゴリズムにもかかわらず、インターネットはたびたび不安定な状態に陥っている。但し、全体がそのような状態になるのではなく、ルータや回線の故障、新たにネットワークの接続、ネットワークの切断等によって、部分的に過渡的な不安定な現象が発生している。例えば、あるネットワークの経路情報の不安定のために発生した経路の発振現象や過渡的なループもしばしば観測される。また、オペレータのミスによって、間違った経路情報が特定のルータから世界

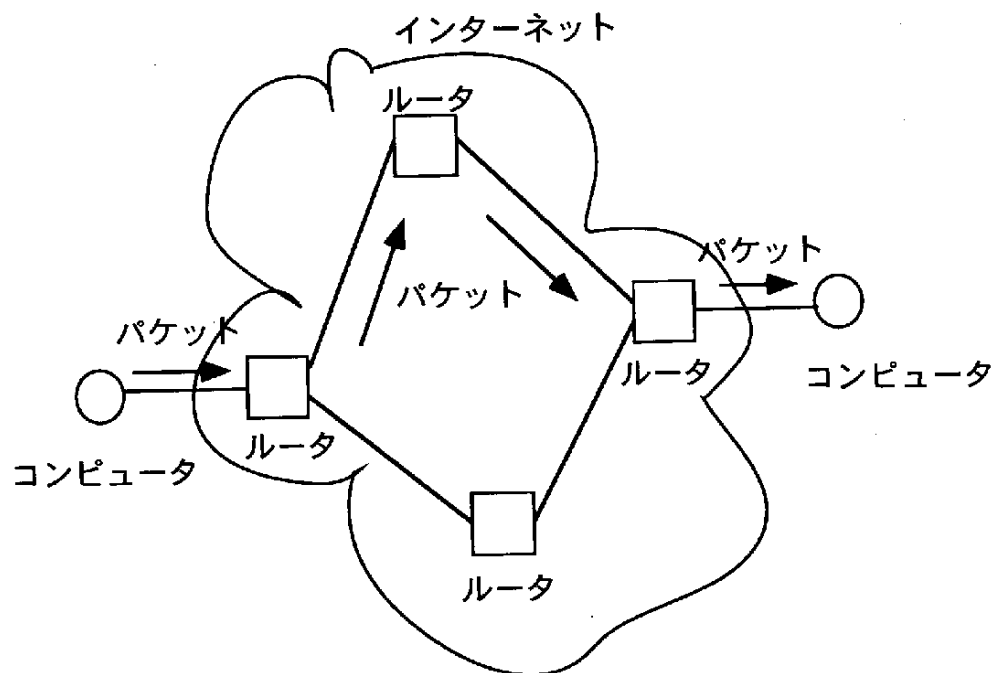


図3.3-1 インターネットの仕組み

へ広がり、それに関連する一部のネットワークに接続できなくなったりすることもまれではない。

このような断続的な不安定性が現われるのは、誰でも、そして、いつでもルータをインターネットに接続できる"開放されたシステム"となっているからである。つまり、インターネットには、中央でネットワークを一元的に管理する組織がない。これに比較し、これまでの電話網では、各電話会社がネットワークを一元的、かつ、厳重に管理する"閉じたシステム"となっており、第三者が勝手に交換機を電話網に接続するのは不可能である。このことは、電話網の安定性をもたらしている。

(2) 不安定性の原因と実際

インターネットの不安定性が顕著になったのは、特に、インターネットの急激な成長が始まったころである(図3.3-2)。1998年1月の時点でホスト数は3000万台、ユーザ数は1億5千万人に達している。また、現在でもホストやルータの数の指数関数的な増加が続いている。このような多数の構成要素が介在するようになると、初期のインターネットとは異なり、限られたオーソリティが個別の装置の面倒を見ることは不可能になっている。

不安定になった原因は、爆発的成長だけでなく、その構造的変化にも求めることができる。初期のインターネットは、米国の各地域のインターネットサービスプロバイダ(ISP)あるいは各国のネットワークが、唯一のバックボーンに接続されるツリー型のインターネットであった。バックボーンが安定であれば、配下のあるISPが不安定となっても他のISPは影響を受けない。その後、ツリー型のインターネットは、その成

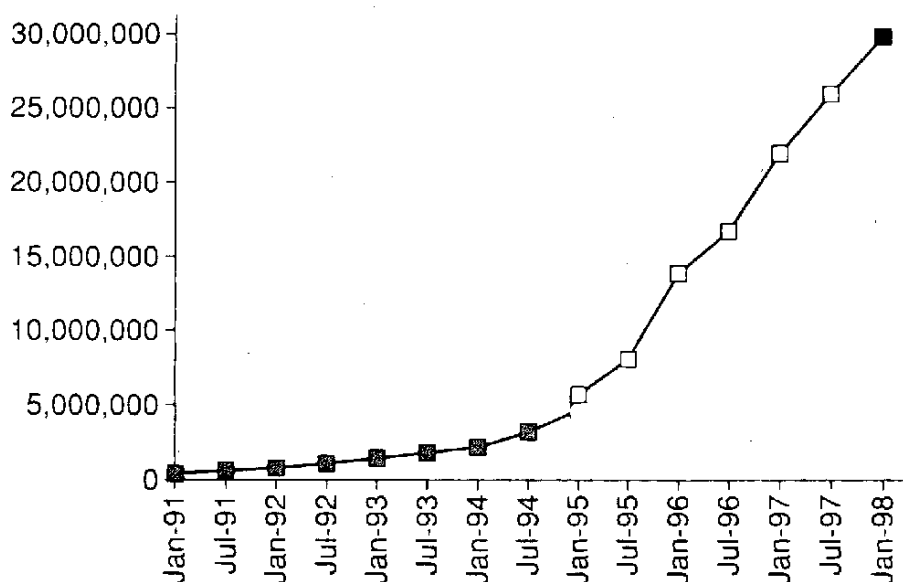


図 3.3-2 インターネットの爆発的成長
(ホストの伸び)

長に伴い、複数のバックボーンの登場によって、地域の各ISP等が網の目状に接続されるメッシュ型のネットワークへとトポロジを変えた。この形態になると、あるISPから、バックボーンや他のISPへは複数の地点で接続される。これは、それぞれの地点からの複数の経路情報が矛盾したり、互いの干渉によって経路制御が不安定になるという可能性を大きくした。しかも、インターネットを構成するISPの数が膨大になったため、常にどこかに異常をきたしており、故障と回復をくり返す断続的な不安定さが目立つようになった。それらの障害の原因は、回線の故障、装置の故障、オペレータのミスなど多岐にわたる。

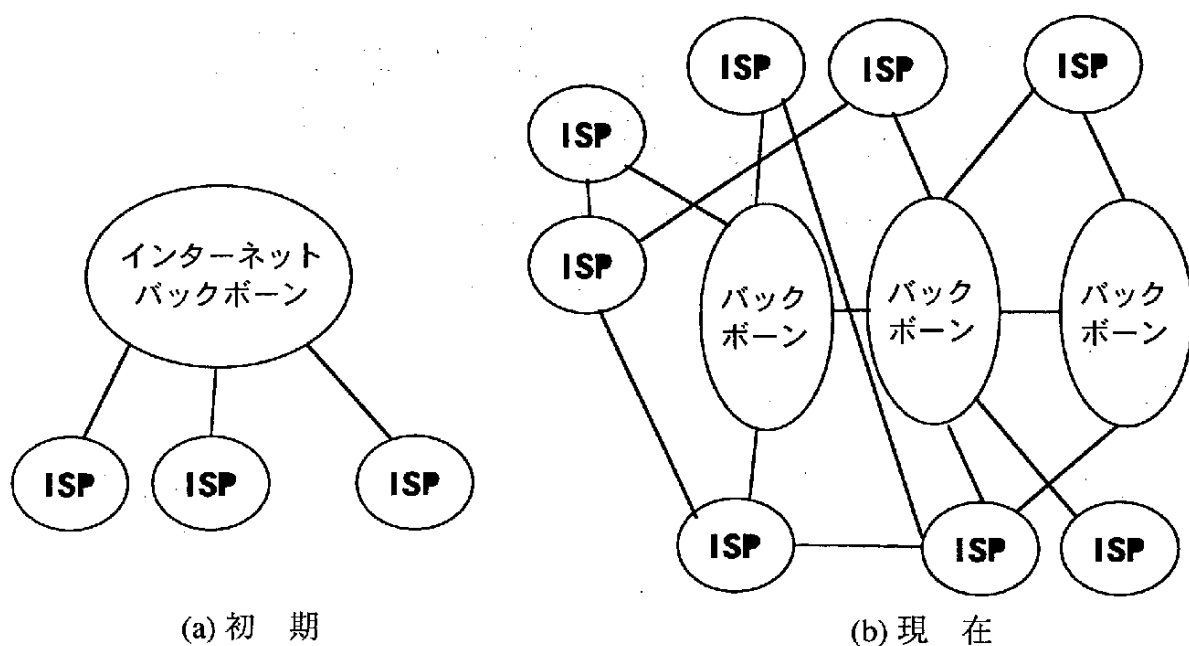


図 3.3-3 インターネットの構造の変化

面白いことに、障害は、遅かれ早かれ各オペレータによって、あるいは自動的に修復される。後者は、ルータの経路制御アルゴリズムによるもので、複数の経路があり、選択している経路が障害になった場合には、ルータは別の経路を選択してパケットを転送するようになる。但し、障害が発生したのだから、結局はこの場合も人手による障害からの復旧が必要になる。しかし、オペレータの存在を意識せず、インターネットだけを眺めていると、まるでインターネットに自己修復機能、あるいは、自己安定化機能が内在するような錯覚に陥る。

以上述べてきたインターネットのダイナミック性は、その経路情報の観測によっても明らかにされている。図3.3-4は、経路情報がどのように更新されているかをインターネットの中心部で観測したものである。世界のどこかで経路に何らかの変化(ダウン、アップ等)が起きるたびにメッセージがやり取りされる。これまで、最大では毎秒60回以上の変化が発生したとの報告もあり、これは、一秒間のうちに世界で60以上の場所でネットワークが変化していることを示している。

相互接続点における経路情報の変化(一週間)

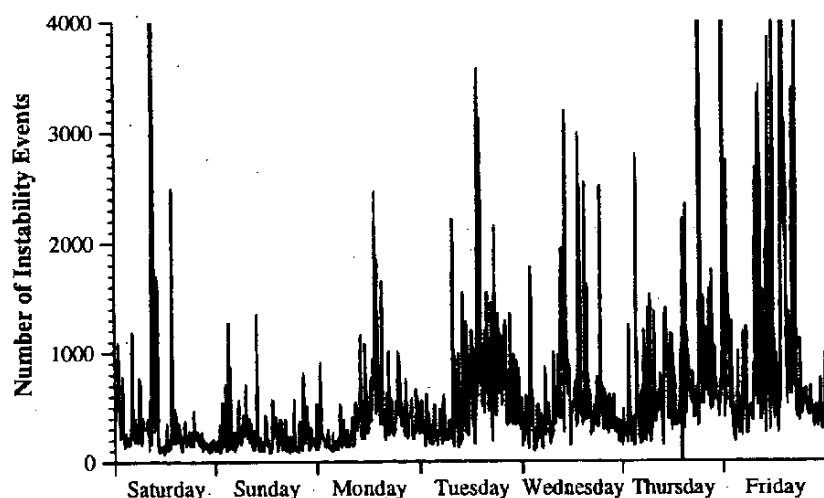


図3.3-4 経路情報のアップデート

(3) インターネットに対する3つの視点

ここで、図3.3-5に示す3つの視点から、インターネット自身が複雑系の目、例えば、創発あるいは、自己組織化などのキーワードで語れるかどうかを考える。

まず、インターネット上の利用者を含めた社会活動システムという点でインターネットを見ると、それはマルチエージェントシステムの一例となり、複雑系ととらえることができるであろう。

次に、ユーザを除外し、オペレータを含めたインターネットを対象とした場合はど

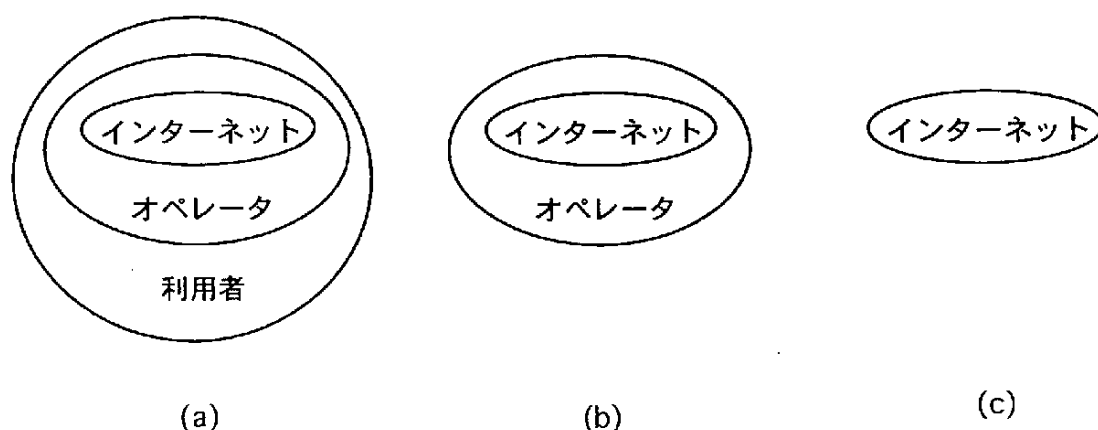


図 3.3-5 3つの視点

うであろうか？ これは、中島秀之氏あるいは竹内郁雄氏による複雑系のタクソノミーではSCS型(Simple to Complex to Simple)というカテゴリーに分類することができよう。すでに述べたように、インターネットのコンピュータやルータの動作アルゴリズムは簡単である。しかし、これらの膨大な数の装置が世界規模で並列に動くことによって、故障、新たなネットワークの接続、既存のネットワークの消滅などが世界のいろいろな場所で断続的に発生し、経路制御のようなシステムの振舞いが不安定になっている。これに対して、経路制御アルゴリズムとオペレータの両方がシステムを安定な状態に戻ろうとする力を働かせる。このため、インターネットは、不安定な状態と安定な状態を持つゆらぎのあるシステムとしても見ることができる。そして、オペレータまで含めたインターネットは、自己復旧、自己組織化、創発、進化などの言葉で語ることができよう。

更に対象を絞り、ユーザもオペレータも除外してインターネットそれ自身だけを考える。これは自動的に修復が行われるシステムでもなく、進化するシステムでもない。前もって需要を予測して回線の容量(速度)や接続形態を決めて設計しており、そのトポロジは極めて固定的なものになっている。なお、複雑系との関連があるかどうかは議論のあるところであるが、ネットワークの設計モデルを研究するトラフィック理論では、最近、インターネットのトラフィックの自己相似性に関する研究が進められている。というのは、設計や解析を行う道具として使われてきた古典的トラフィック理論では、主に呼の発生やサービス時間が指数分布に従うという前提で考えられてきたからである。自己相似性を持つインターネットのトラフィックに対して、どのようなモデル化を行い、どのような解析手法を取ればいいのかという議論が盛んに行われるようになっている。

3.3.2 自己組織化を行うネットワーク

(1) 分散エージェントによる動的ネットワーク

これまでインターネットが複雑系の視点から語ることができるものかどうかについて議論し、オペレータを含んだインターネットはSCS型に分類されるという議論を展開してきた。が、やはり後ろめたさは残る。確かに、自己再編や自己修復という見地で見ると、オペレータも含めたインターネットは、複雑系という視点で見ることでもできよう。しかし、オペレータを除いて裸にしたインターネットは、単にエントロピーが増大し秩序が失われていくだけのクローズドシステムにすぎない。また、あるネットワークの部品の単純な振舞いの規則からネットワークが創発されるわけでもない。

そこで、ここでは、より積極的に複雑系としてのネットワークを考えるため、自分自身のトポロジを変化させる仕組みを内在するネットワークの可能性について議論する。これは、本来はオペレータや管理者の役目であるネットワークの再構成を行う機能をネットワーク自身が備え、自己組織化を行う動的なネットワークである。これまで、ネットワークの設計や変更は、長期的なトラフィック予測に基づいて行われてきた。しかし、ネットワークのトラフィックは、時間ごとに異なるため、固定的に与えられたトポロジや帯域ではより良い制御ができないという問題がある。もし、状況によって自動的にネットワークのトポロジが変更されれば、この問題を改善できる可能性がある。

自己組織化するネットワークでは、図3.3-6に示すように、ルータ間の接続を行う回線自体が任意のルータ間の接続ができるネットワークになっていることを前提とする。ルータ間の接続は状況に応じて動的に変更される。例えば、あるルータ間で多量のトラフィックが発生した場合には、そのルータ間に並列の回線が設定される。また、トラフィックのなくなった回線は他に利用されたり、切断されたりする。このネットワークには、いくつかの制約条件が存在する。例えば、同時に接続できる相手の数、回線を接続するルータのポート数などである。しかし、全部のルータが直接接続されている必要はない。というのは他のルータを介して間接的に接続できれば、そのルータがパケットを中継するので、通信は保証されるからである。それでも、介在するルータ数は極力少なくしたほうがパフォーマンスが向上する。これは、ルータを通過することによって、パケット転送の遅延が増加する等の影響が出るからである。

自己組織化するネットワークは、前もって計算を行った上で固定的に資源の配置を行うこれまでの硬直的なネットワークとは異なり、各コンピュータが発生するトラフィックの状況に応じてより効率を高めるような資源(回線など)の再配分を行うシステムである。そのイメージは、必要な資源、例えば、コンピュータ、回線、ルータを紙ふぶきのごとくばらまけば、自然に相互接続が行われ、風がふくたびに、トポロジが自動的により良い状態に変更されるというものである。

このようなネットワークでは、ミクロレベルであるコンピュータのフロー制御とマクロレベルのトポロジ制御の間に相互のフィードバックが働く。即ち、各々のコンピュー

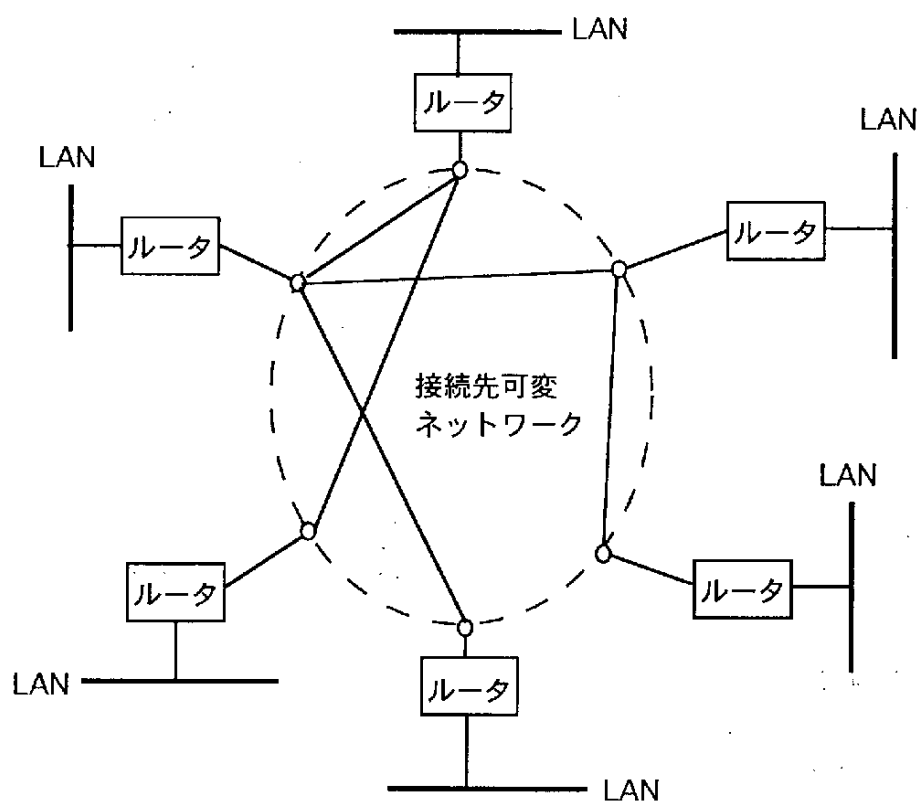


図 3.3-6 自己組織化を行うネットワーク

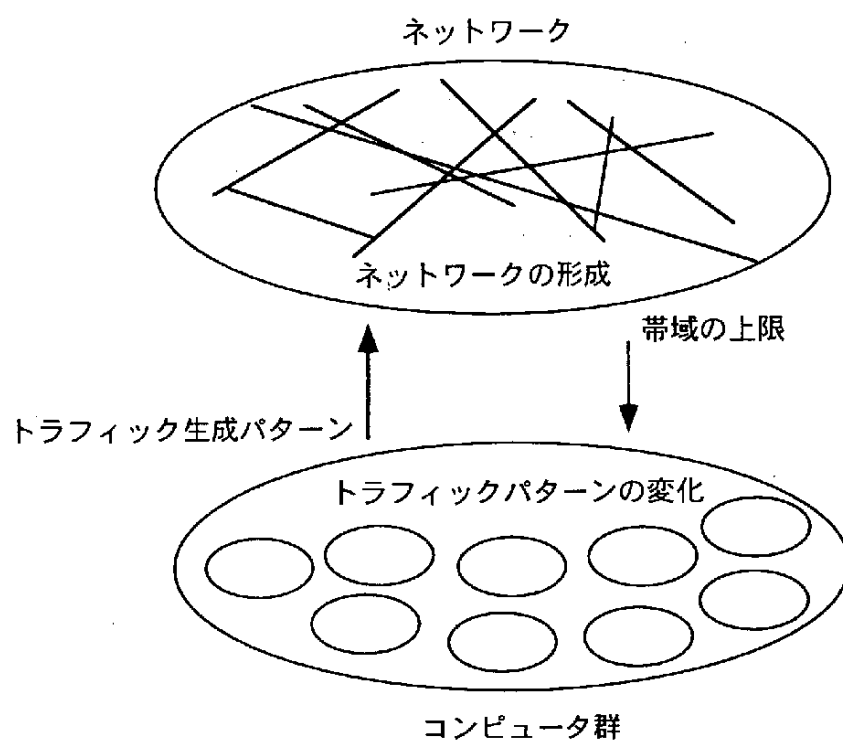


図 3.3-7 マクロとミクロ間の相互フィードバック

タは、自分へのネットワーク資源の配分をできるだけ多くするように、パケットの転送レートを増大させてゆく。これにより、マクロレベルのトポロジの変更が行われる。しかし、その一方で、コンピュータは、ネットワークが輻輳(能力以上にパケットがネットワークに入れられ、性能が顕るしく劣化すること)しないように、ネットワークの負荷状態を動的に検出して転送レートを調節する。これにより、トポロジが決められると、それによって与えられる帯域の範囲内で最適制御を行い、輻輳崩壊が発生しないようにするというフィードバックがかかる。つまり、コンピュータ側とネットワーク側の相互のフィードバックがかかることになる。

(2) コネクティクスに基づく非平衡ネットワークモデル

従来のモデルは、ネットワークを静的なものとし、古典的トラフィック理論による計算の結果に基づいて長期にわたる変動を見越してネットワークの構築を行ってきた。例えば、利用者の増加やトラフィックの増加等である。そして、どのルータとどのルータの間に直通回線を敷設するか(トポロジの設計)、あるいは、その速度(帯域の設計)をどの程度のものにするか等を計算する。それに基づいて計画的にネットワークを構築したり変更するのはネットワーク管理者の仕事である。ネットワークは、短期的あるいは中期的には状況の変化によって動的に変化することはない。

一方、自己組織化するネットワークでは、状況に応じた適切な資源(回線など)配分が行われるように動的にネットワークの接続状況が変わるという非平衡ネットワークの立場を取る。ネットワークは、そのトポロジや回線速度などを常に適切な状態に保つように変更してゆく。それらを決定するのは、各コンピュータが発生するトラフィックである。そのトラフィックから論理的なルータ間の接続の強度を計測し、より強いものがより近い距離に配置されるように接続を変更する。

ここでコネクティクス(Connectics)という考え方を導入する。コネクティクスは、近傍系理論とも言い、造語である。これにより、1990年ごろに電気通信大学の竹内郁雄教授(当時、NTT研究所)が"中間的な要素に目を向けるメソスコピックな視点の必要性を指摘した。コネクティクスでは、全体は部分の単純な和ではなく、要素還元的な見方では解釈できないシステムが存在すると考える。ただし、全体論とは違い、マクロとミクロの間にメソスコピックな視点、即ち近傍を導入する。そして、近傍の積層関係が全体を創発していると考え。例えば、インターネットにおけるミクロ、メソ、マクロのレベルは、それぞれ、コンピュータやコンピュータの集合(LAN)、LANの集合体またはインターネットの管理単位である自律システムAS(Autonomous System)、バックボーンで結合されたインターネット全体ということになる。ここでの近傍は、ASや通信のローカリティーを持っているLANの集合ということになる。なお、ASとは、同一組織が運用管理するネットワーク(LANの集合)であり、インターネット(ネットワークのネットワーク)を構成する単位となっている。各大学や企業等のネットワークがこれに相当する。

自己組織化するネットワークの仕組みは、上記ネットワークのAS内のルータ間、あ

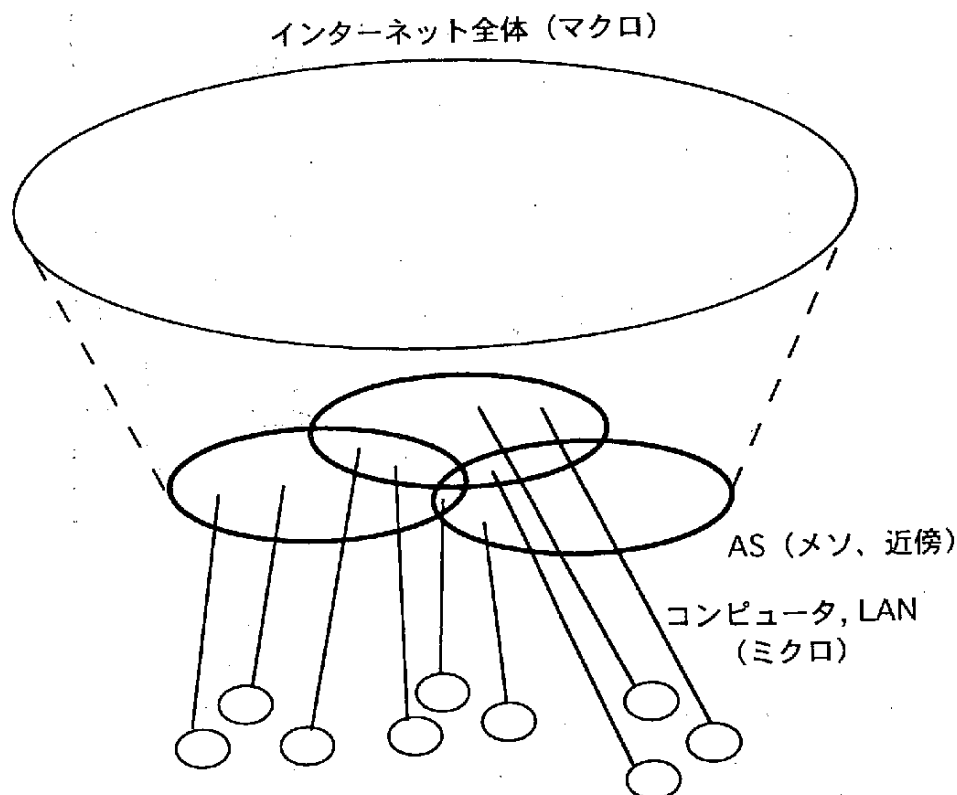


図3.3-8 インターネットの3層構造と近傍

るいはAS間に導入することができる。この場合、ルータ間の回線自体が、接続相手を自由に変更できるネットワークになっている。各ルータは、おのものが独立したエージェントとして動作し、自分の最も頻繁に通信する相手のルータへ直接回線を接続するように試る。しかし、回線は他の近傍のルータのトラフィックも通る共用資源であり、しかも、接続先のルータのポートが全部ふさがっていることもあるため、近傍のルータとの協調によって接続先や利用する回線の数などを決定する。また、異なるルータへ接続要求が複数の近傍から出され、回線をめぐる競合も発生する。その場合には、どのルータへ接続するかを、回線を相手のルータへ接続した場合に流れるトラフィック量を比較して決定する。より多いトラフィック量が流れるような接続のほうが、回線の利用効率が高くなるからである。なお、この仕組みについては、詳細に述べる。

(3) システムとアルゴリズムの概要

具体的に話を進めるため、ここでは、ルータ間を接続するネットワークとして、光ファイバ中にいくつも独立した回線を通すことのできる波長多重方式、そして、それらの接続変更を行う装置として光スイッチを使ったネットワークを想定する(図3.3-9)。ルータは、この光スイッチに対して接続先を示して接続要求を出す。光スイッチは、光ファイバ中の波長をスイッチで多段に接続して、目的のルータに接続する。

あるコンピュータから別のコンピュータまでパケット中継する方法として、何段も

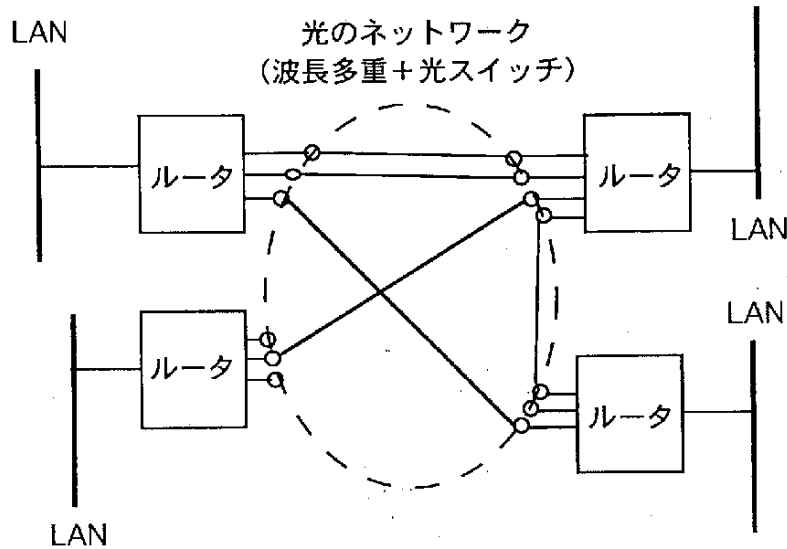


図3.3-9 想定するネットワーク

ルータを経由する方法と光の中継光スイッチを経由して少ないルータの中継数でパケットを転送する方法がある。原理的には後者が有利である。というのは、ルータを通ると遅延や一時的輻輳によるパケットの破棄が発生するからである。光スイッチのほうはそのまま光が中継されるだけなので、遅延の影響を受けず、パケットの破棄も発生しない。但し、いくつかの制約条件がある。

1. 光ファイバ中に入れられる波長の数には上限があるため、接続先の数にも限りがある。
2. ルータのポートの数の上限があるため、接続できる相手のルータの数も限られる。
3. 接続先のルータのポート数にも上限があるため、接続できない場合もある。

このように、波長数、ポート数には上限があり有限な資源となっている。そのような制約の下で、各ルータは最大のスループットあるいは最小の遅延等の目標を達成すべく回線を奪い合う。このネットワークは、コンピュータの非決定的な振舞いによってトラフィックパターンが変化し、その結果としてトポロジが変化するが、このようなネットワークでは、いくつかの局所的な準安定点があることが知られている。

自己組織化するネットワークの利点は、これまでの設計法と異なり、ルータ間を接続する回線の数やトポロジを適当に決めて良いことである。つまり、ドンブリ勘定でネットワークを初期設定することができる。そして、発生するトラフィックのパターンに適合したトポロジへ近づくように、ネットワーク自身が自動的にルータ間の接続を変更してゆく。このため、時間ごとに変動するトラフィックパターンに追従できるようになる。

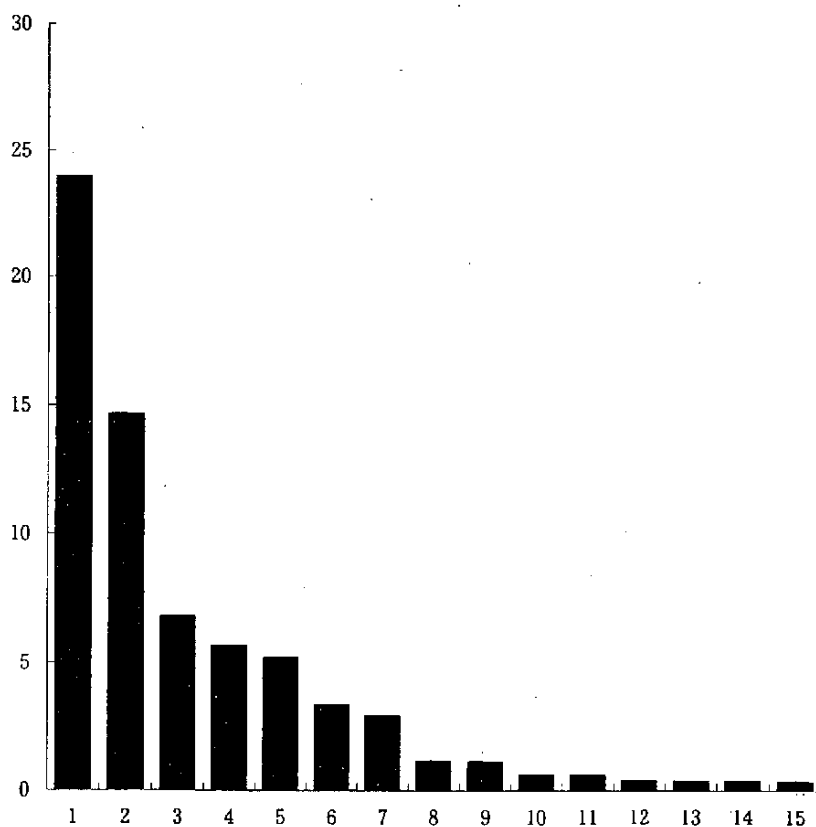
(4) 物理近傍と論理近傍

これまでのアルゴリズムを実現するためには、何らかの指標が必要である。ここで、物理近傍と論理近傍という概念を導入する。前者は、物理的結合度が強いルータの集合である。例えば、ルータ間の結合の強さを表わす指標には、

- ・ ホップカウント(ルータ間に介在するルータの数)
- ・ ルータ間の帯域(接続のスピード)

などがある。

一方、コンピュータのアセスパターンにはローカリティが認められる。例えば、アクセス頻度の高い順に通信相手を並べると通信頻度は図3.3-10に示すように $1/f$ の傾きとなり、Zipfの法則があてはまる。このような頻度の高いアクセスを行う特定のスイッチの集合を論理近傍と呼ぶ。なお、Zipfの法則とは、本来、英語の単語の出現頻度を表わす式であり、出現頻度=定数/順位 n で表わせる。ここで n は1である。



X軸は頻度順、Y軸は全体に占める%

図3.3-10 アクセス頻度

論理近傍の強さは、以下のような指標で表わされる。

- ・ 通信量
- ・ パケット数

自己組織化を行うネットワークが想定する非平衡ネットワークモデルでは、物理的な近傍の関係が論理的な近傍の関係に近づくように各ルータが複数の接続先を変更してゆく。しかし、ネットワークが有限の資源からできているために、論理近傍と物理的な近傍は必ずしも一致させることができない。ここで、物理近傍と論理近傍との差をポテンシャルエネルギーと考える。それは、物理近傍が論理近傍へ近づこうとする力が常に働くからである。図3.3-11にそのイメージを示す。物理近傍は、論理近傍との差、つまり、ポテンシャルエネルギーが低い点を求めて移動する。ポテンシャルエネルギーの局所安定点に落ちこみつつも、新たな通信相手の発生という要因によって遷移が行われ、別の局所安定点に移動する。

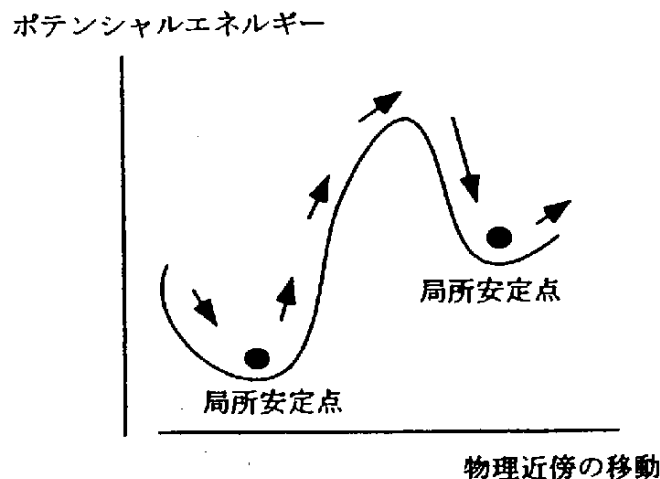


図3.3-11 局所安定点

(5) 回線の設定における協調と争奪

このネットワークでは、ルータが孤立しないように、各ルータが少なくとも1つの他のルータと接続されていることを前提にしている。その上で、回線の設定/変更によって、より良いトポロジを得る。また、ショートカットや並列回線によってより大きな帯域(速度)を得る。

あるルータがどのルータとの間に回線を設定するかは、そのルータが中継するパケットのトラフィックパターン(転送先と転送量)によって決定される。しかし、そのルータ単独ではなく、論理近傍のルータのトラフィックも反映する必要がある。なぜならば、単独のルータには接続数の制限があり、論理近傍のルータ同士が協調して回線を設定しなければ平均のホップカウント数や遅延が小さくならない恐れがあるからであ

る。設定される回線には、その回線が収容されたルータだけでなく近傍のルータからのトラフィックも流れることになる。

各ルータは、常にトラフィックをモニタしており、ホップカウントが大きい(つまり、ルータを多数経由している)経路で、しかも、時間あたりの転送量が大きくなったストリームを見つけると、そのホップカウントを減らすために新たな回線の接続を試みる。しかし、ルータのポート数には限りがあるため、回線の設定にあたっては、競合が発生する可能性もある。そこで、次のようなシーケンスで順に回線の設定を試みる。(1) まず、当該ルータのポートからトラフィックの多い転送先を配下に持つルータへの接続を試みる。もし、自分のポートに空きがない場合、すでに使用されている回線を取る挙げることを試みる。この場合、以下に示すメトリックによって使用されている回線の優先度を評価し、それよりも新たな接続の優先度が高い場合、その回線を切断し、新たな接続を行う。(2) 逆に、新たな接続要求の優先度が低い場合、論理近傍の関係にあるルータの中で一番近いルータに対して、相手ルータとの間に回線を設定することを要求する。(3) なお、相手ルータのポートに空きがない場合には、相手ルータに一番近い論理近傍のルータに対して回線設定を試みる。

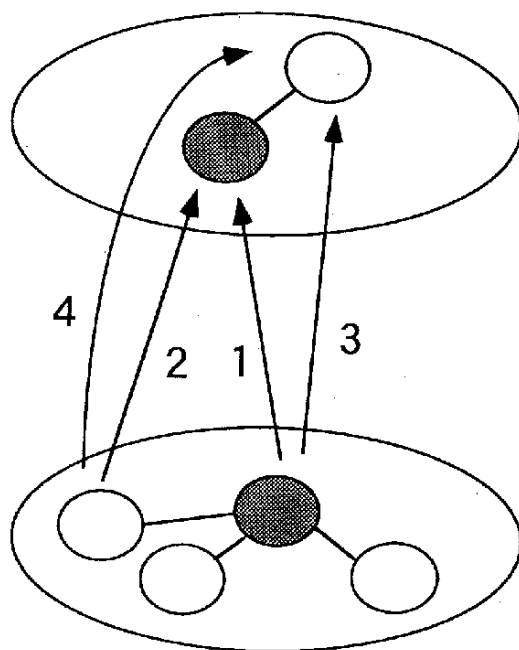


図 3.3-1 2 回線の設定シーケンス

各要求の優先度を決定する場合、以下のメトリックを使用する。

$$P = \text{SIGMA } W_i * T_i \quad (\text{式1})$$

ここで、 T_i は、回線が設定された後に流れるであろう論理近傍のルータ i からのトラフィックの予測値、 W_i は、使用するポートを持つルータからの距離(ホップ数)を重みとしたものである。つまり、 P は、各ルータの予想トラフィックに重みづけを行った

要求の強さを表わす指標となる。この場合、接続先の論理近傍でも、同様にPを計算し、それらの和を総合的な優先度とする。そして、これが一番大きな値を持つ回線の設定リクエストに対して、回線が割り当てられる。

3.3.3 自己組織化ネットワーク研究への展望

現在までのネットワーク設計は、全体のトラフィックを予測し、それを基にトラフィック理論によって必要な回線や帯域を決めてきた。これに対し、ここで述べた自己組織化するネットワークは、動的により良い資源配分を行おうという試みである。このようなネットワークのトポロジを創発させるという試みは他では、まだほとんど行われていないようである。その理由の一つは、すでに述べた通り、振舞いの把握できないものは、エンジニアリングの立場から見てリスクが多すぎるということである。しかし、それはそれと割り切って、リスク自身を楽しむというアプローチも必要である。また、このアプローチにおいて、安定性を改善し暴走を防ぐようなリスク回避の仕組みを入れていけば、新しいネットワーク設計パラダイムとして、将来実用に供することもできるであろう。

上記の研究と共に行わなければならないのは、コンピュータが発生するトラフィックのモデルの研究である。というのは、自己組織化するネットワークの変化をもたらすものは、各コンピュータが発生するトラフィックであり、その特性を把握しておくことが必要だからである。これまでの古典的なトラフィック理論は、主に呼の発生間隔やサービス時間が共に指数分布に従うという前提で、マルコフモデルを考えてきた。ところが、W. Lelandらが、イーサネットのトラフィックが自己相似性を持つことを指摘したのを契機とし、その発生モデルや近似的解析手法の研究に力が入れてきた。今後の研究の進展に期待するとともに、それらを自己組織化ネットワークのアルゴリズムに盛り込んでアルゴリズムの改善を行うことも必要となろう。

3.4 エージェント指向の複雑系の情報処理研究の現状

出口 弘 委員（京都大学 大学院経済学研究科）

1998年12月に自律的エージェント指向のアプローチを行っている、米国、英国の大学、研究所を幾つか訪問した。ここではその際の議論や情報にもとづきつつ、情報処理に関連した複雑系に関する研究の現状をまとめてみたい。

3.4.1 ミシガン大学

ミシガン大学では、コーエン教授、アクセルロード教授、それにミシガンの複雑系の教育プログラムとそこでのシミュレーションプログラミングを手掛けているリオロ氏に会って情報交換をした。コーエン氏とリオロ氏の所属しているのは、School of Informationであり社会科学ではない。実際にはミシガンでは社会科学とエージェントベースのアプローチのコラボレーションが行われてきた。

彼らは3人の名前を冠したCARプロジェクトで、サンタフェ研究所の開発したマルチエージェントシミュレーション言語であるSwarmを用いて8つの社会科学のプログラムを記述している。なおこのSwarm1.31は、現在Windows版がサンタフェからGPLでリリースされている。

このエージェントベースのシミュレーションに関して、彼らはKISS(Keep It Simple and Stupid)というモデルの単純化原理を主張している。これは自律的エージェントによる複雑な現象の説明モデルで、モデルの側が複雑になり過ぎることを防ぐ一種のオッカムの剃刀原理である。数理モデルでもこの種の単純化はセンスのよいモデルを作るためには必須ではある。シミュレーションの領域ではこれがとりわけ重要になるというのが彼らの主張である。これについては首肯できる面もあるが、よりリアルなデザイン能力を持った社会経済システムのモデルをエージェントベースのシミュレーションによって分析するためには、KISS原理を越えたアプローチが必要となる。後述するように産業領域でエージェント指向の研究をしている研究者は社会経済システムのより現実的で大規模なモデルの複雑性に対処しようとしている。

3.4.2 アイオワ州立大学

アイオワ州立大学ではAgent Based Computational Economicsを主唱しているテスファション教授を訪問し、CAS(Complex Adaptive System)のワークショップで依頼された90分の講演を行った。教授はACE(Agent based Computational Economics)を中心に社会科学関連のエージェント指向やCAS指向の研究者向けのWWWサイトを作っている。テスファション氏は経済学者としての専門は労働経済学で、複雑系の方ではハンドシェイクの

ある四人のジレンマを拡張したようなトレードモデルを扱っている。

3.4.3 サンタフェ研究所

サンタフェ研究所では、研究者ではなくDirector of Business RelationsのSuzanne Dulleさんに会い研究所の向かっている方向とそのマネジメントについてかなり詳しく話を伺えた。サンタフェではFuture Workとして社会科学を強化し、政策デザインのできる理論を目指してるようだが、実際には社会科学は弱く、中々難しいようである。

実際Future Workというスライドを見せてもらったのだが、その中ではEvolutionary Dynamics-Start from biological system, move to social systems, Integration of form and organization with dynamics--understanding formation of network reactions, Robustness in social and natural systems -- what makes an ecosystem, economic and social system robust?, Complex network dynamics --large scale networks, information processing, telecom, Internet などとあり、社会科学に乗り気が十分のようにも見える。またBアーサーは、マイクロソフトの訴訟に関連してincreasing returnの話をしており、政策デザインのできる理論を目指しているのだろう。

サンタフェの特色はやはり数理、物理屋をコアにした学際研究にある。社会科学に関して何か特に強いイニシアチブがあるわけではなく、結局ここに参加している各々の研究者が学際的でありそれによってグループ間で学際的な交流が行われるということ。そうするとやはり全体の方法論的リエゾンが欲しくなるわけで、実際キャストイは全体のリエゾンとなっているとのこと。

3.4.4 南カリフォルニア大学

南カリフォルニア大学では、ヤン・ジン(Yanjin)先生を訪ねる。ヤン・ジン氏はシビルエンジニアリングが専門で、スタンフォードのレイモンドデビット教授の弟子でデビット教授と、人間の活動を支援するエージェントモデルとして、VDT:Virtual Design Teamの研究を行ってきた。このVDTはサンタフェのSwarmを開発するにも参考にされた。

ヤンジン氏は人間の活動を支援するエージェントと、人間はどういうふうに仕事をするべきかを理解するためのエージェントの二つを研究している。ただし前者が中心で後者をこれからやっていくとのこと。また組織論の中で現在ノレッジマネジメントという分野がなりたっているが、彼のノレッジマネジメントは会社の中で個々の人間にそれぞれエージェントがついて、その個々の人間の知識を学習したエージェントが、情報交換するようなモデルを考えているとのこと。

現在特に力を入れているのが、KICAD Knowledge Infrastructure for Collaborative and Agent based Designである。これはグループでエージェントが個人の仕事を支援するも

の。将来企業はエンタープライズ・オペレーティングシステムになると考えている。今の段階ではデザイン部門を想定してモデルを立てている。100人のデザイナーの上にエージェントがいて、そのエージェントの雲の下に人間がいる。そこに人間がプラグインする。エージェントは人間を支援する。これは情報のレベルでの支援と知識のレベルの支援がある。上司や先輩に聞く代わりにエージェントに聞くというようなシステムを考えている。エージェントが人間から学習すると同時に人間を助けるモデルである。これは理論的にも非常に難しい。これには人間のデザインのプロセスモデルが必要であり、従来のワークフロのようなモデルでは扱えない領域である。

これらの研究については、日本の企業からもだいたい資金がでているとのこと。

また彼らは、MITのトム・アロンのコーディネーションサイエンスの主張などに影響され、エンジニアリングデザインに限定したディペンデンシーの理論を考えている。ディペンデンシーがライフサイクルを持っている。これが組織の中でどう機能しているか。ディペンデンシーマップがあればコーディネーションが合理的にできると思っている。彼らは現在の組織はコーディネーションをやりすぎていると考えている。ヤン氏は組織の構造解析をディペンデンシー解析の理論として作ろうとしている。これが分かれば組織のコーディネーションの仕事が必用ないことになる。また前もって合理化がかなりできる。研究としては、ツールを提供するだけでなくメカニズムを考えている。

3.4.5 スタンフォード大学

スタンフォードの大学のレイモンド・デビッド教授はマーチの弟子で、専門はシジルエンジニアリングである。デビッド氏の現在取り組んでいるVDTは、組織に対する情報プロセスアプローチで、基本的には情報をソフトエージェントが持っていて互いに交換したり、人間からエージェントが知識を学習するモデルを扱っている。

彼のアプローチは、製品デザインのようなプロセスの支援がターゲットになっている。コンカレントエンジニアリングのような設計支援アプローチでは、多くのコーディネーションが必要でこれに時間がかかる。彼のアプローチではそれが短縮できる。実際の事例として、ロッキードの衛星打ち上げ用のロケット開発に用いられたケースで80%時間が短縮できたとのこと。

デビッド氏のアプローチでは、いろいろなエージェントからなるグループのプロジェクト的な活動のどこに問題があるかを明らかにするための一種の指標計算を行ってくれる。そのためにVDTは例外事項がプロジェクトのタスクの中で発生したとしてその処理の負荷などを指標化して計算している。このアプローチの狙いは、マクロとミクロをつなぐ中間のところの複雑性を処理することである。これはまったく同感である。

VDTは、シミュレーションモデルとしては拡張されたパートプロジェクトマネージャという感じである。ただしモデルはグラフィカルに非常に容易に作れる。またエー

ジェント間のマネージメントの関係や活動間の相互ディペンデンシーが記述でき、そこでバックログの可能性や、失敗の可能性、各エージェントの負荷などがグラフの形で表示される。

3.4.6 サーレイ大学

ロンドン郊外のサーレイ大学には、N.ギルバートが代表であるCenter for Research on Simulation in the Social Scienceがある。彼らはSimulating Societyという研究活動を組織しており、私も以前にイタリアのシエナでのSimulating Societyの会議に招待されたことがある。彼らはエレクトロニックジャーナルとしてのJ of Simulating Societyを発刊している。またヨーロッパ地域でのエージェント指向のシミュレーションに関する活動をリードし、様々な政策的なプロジェクトへも参与しシミュレーション分析の応用を試みている。

3.4.7 結 論

企業や組織などの自律的エージェント集団の意味での複雑系に関する新しい理論が現在、急速に同時平行的に世界各地で立ち上がりつつある。それは次の世紀の社会経済システムのグラウンドデザインのための思想としても着目されつつある。サンタフェ研究所やニューイングランド複雑系協会は、銀行家が重要なファンドを提供しており、新しい社会経済システムの秩序作りに関する問題関心がある。だがエージェント指向の複雑系に関する具体的な手法を見たとき、一方で上記の、KISS原理に基づくアプローチがミシガングループにより主張されている。他方でヤンジン氏やデビッド氏のようなエンジニアリング領域でエージェントを研究しているグループは、具体的な組織や産業の問題に適用することのできるような複雑さを扱うことを主張している。筆者の複雑系に関するエージェント指向のアプローチもこの後者のアプローチに近い。そこでは現実の産業領域で利用可能な複雑系のモデルとその応用ための方法論が模索されており、今回の調査を通じ、これに関する多くの知見を得た。

結果として我々が日本で行っているアプローチが世界的に新しいものであることを確認できた。

3.5 インターネットのためのテキスト処理

佐藤 理史 委員（北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科）

インターネットのためのテキスト処理に対する一つの見方を示す。まず、今までのテキスト処理と何が異なるかを明らかにした後、その核となる技術について議論する。

次に、現在の主要技術を概観する。最後に、関連する我々の自動編集に関する研究を紹介し、複雑系との接点を探る。

3.5.1 インターネットのためのテキスト処理

「インターネットのためのテキスト処理」とは、おおよそ、インターネット上を流通するテキストをなんらかの意味で処理することを指すものとする。対象テキストは、主に、電子メール、電子ニュース、ワールドワイドウェブなどのテキストであり、これらの検索、分類、要約などを実現するためのテキスト処理がその典型となる。

(1) その特徴は

「インターネットのためのテキスト処理」は、単なる「テキスト処理」と較べてどこに特徴があるのだろうか。そこでまず考慮しておかなければならないポイントとは何なのだろうか。

現時点における筆者の答は、以下の3点に集約される。

1. 応用指向である ⇒ 手段としてのテキスト処理

インターネットのためのテキスト処理においては、テキストを処理することそれ自身に目的があるのではない。テキストを処理することは、何らかの機能（検索、要約、分類など）あるいは応用システムを実現するための一つの手段に過ぎない。その機能やシステムが便利なものとして使われれば成功であるし、使われなければ失敗である。極端な話、テキスト処理を全く使わない方法の方が良ければ、それでもよい。

2. 大量のテキストを扱う必要がある ⇒ 高速な処理

必ずしも全ての応用が大量のテキストを扱う必要があるわけではないが、ウェブのテキストを扱う応用においては、ギガバイト以上のテキストを扱う必要性が生じてくる。このような大量のテキストを処理するためには、処理の高速性が要求される。

3. 低品質のテキストを扱う必要がある ⇒ ロバストな処理

これまでのテキスト処理の対象は、新聞などに代表されるような、プロの編集者の

手を経た高品質なテキストであった。これに対して、インターネットで流通するテキストは、高品質なテキストもあるが、アマチュアが作成した低品質な（誤りなどを多く含んでいる）テキストも珍しくない。このようなテキストに対しても、それなりに処理が行なえるようなロバスト性が要求される。

これらの点をまとめると、インターネットのためのテキスト処理は、「インターネットに関連した応用を実現するために使われる、高速かつロバストなテキスト処理」と考えることができよう。

(2) 応用システムの目的は

上記のような特徴を持ったテキスト処理において、何が中心技術となるのかを考えるために、まず、実現したい応用がどのようなものなのかを考えてみよう。

少し抽象的に応用システムの目的を捉えるならば、以下の3つに整理できると考えられる。

・ 情報収集を支援する = 知識源としてのインターネット／テキスト

現在のウェブは、膨大で多様な情報を有しており、何か知りたいことがある場合にウェブを調べるということが、多くの人々にとって一般的な手段となりつつある。この意味において、ウェブは、非常に強力な情報源としての役割を果たしつつある。しかしながら、ウェブから求める情報を探し出すことはそれほど簡単ではない。このため、人間の情報収集行為を支援するシステムが不可欠となる。このようなシステムとして、現在、各種の検索エンジン（サーチエンジン）やウェブディレクトリがある。一方、これとは独立に、大量のテキスト情報から有用な情報を見つけ出そうという研究（テキストマイニング）も行なわれており、イントラネットやインターネット上のテキストに対してこれを適用することが考えられている。これも、テキストを情報源として利用する一つの応用である。

・ コミュニケーションを支援する = コミュニケーションの手段としてのインターネット／テキスト

電子メールは、多くの人々にとって、コミュニケーションの手段の一つとして日常的に利用されている。これは音声（電話）に対するテキストの復権でもある。しかしながら、一度に複数の宛先にメールを送ることが簡単にできるため、電子メール洪水の問題が発生しつつある。特に、スパムメール（ゴミメール）の問題はいらだたしい問題である。これらの問題を解決するために、電子メールの自動選別、自動分類などが求められている。また、人間の代わりにメールに返答する自動応答システムなども有用かもしれない。

これらは、広い意味で、人間間のコミュニケーションを支援するものと考えることができる。

・理解を支援する＝テキストには解釈が必要

我々が最終的に得たいものは、テキスト（文字列）ではなく、それが伝達する情報である。テキストから情報を得るためには、必ず、理解（解釈）と呼ばれる処理が必要であり、それなりの時間が必要となる。そのため、テキストの量が増えると、それら全て目を通すのは苦痛となる。これを軽減するために、テキストの自動要約、自動分類、ビジュアライゼーション（アウトライニング）、テキストからの情報抽出が求められる。

(3) 核となる技術は

上記の3つに全て「支援」が付くのは偶然ではない。インターネットは情報の流通路であり、そこを流れる情報は最終的に人間によって使われるからである。

近い将来、人間と同じように情報を処理する（テキストを理解する）機械を実現できるとは考えられない以上、必然的に、機械の目的は人間を支援することになる。

情報収集の支援、コミュニケーションの支援、理解の支援のいずれにおいても、意味のある支援を行なうためには、機械があるレベルでテキストを「理解」することが必要になる。一例として、情報検索（テキスト検索）システムを考えよう。「機械翻訳」という入力キーワードに対して、それに関連するテキストを出力するためには、システムは、それぞれのテキストが「機械翻訳」に関係あるかどうかを判定しなければならない。つまり、システムが出力したテキストは、システムが「このテキストは機械翻訳に関係ある」と判定（理解）したテキストなのである。

この理解のレベルは、以下で述べるように「テキストの内容をタームとして表現する」というものであり、テキスト内容の概略を把握する方法である。

ここでは検索を例に挙げたが、選別、分類、要約のいずれにおいても、それを実現するためには、テキスト内容のあるレベルで把握（理解）することが必要になる。

把握すべきものは、実は内容だけに限定されるものではない。テキストの形式に関する把握も同様に重要である。以下に、把握すべき情報のリストを示す。

1. 形式

- (a) 言語・・・どのような言語で記述されているか (ex. 日本語、英語)
- (b) 形式種別・・・どのような種類のテキストか (ex. 新聞記事、手紙、論文)
- (c) スタイル・・・どんなスタイルで書かれているか (ex. フォーマル、カジュアル)

2. 内容

- (a) 内容種別・・・何について書かれたテキストか (ex. 経済、コンピュータ、北陸先端科学技術大学院大学)
- (b) 主題／サマリ・・・そのテキストが伝える最も重要なことは何か

それぞれの情報をどの程度の詳しさに把握するかという点はそれほど明確ではないが、それぞれのテキストに対して、これらの情報を把握する技術が、インターネットのためのテキスト処理における中心技術となると考える。

3.5.2 現在の主要技術

ここでは、まず、テキスト内容を把握する方法として、現在どのような方法が用いられているのかを示した後、テキスト検索、テキスト分類、テキスト要約、情報抽出が、それらをどのように用いて実現されているのかについて述べる。

(1) テキスト内容の把握

現在、テキスト内容を把握するために用いられている主要な方法は、統計的把握と局所的理解の2つである。

(a) 統計的把握

テキストの統計的な性質を用いて、その内容を把握する方法である。最も一般的なのは、テキスト内に出現する語（ターム）の頻度統計を求め、テキストの内容に関連したタームを決定する方法である。

あるタームがテキスト内容とどの程度関連しているかを、そのタームの頻度により推定するという方法は、Luhnの研究[1]に遡ることができる。彼は、タームを、高頻度語、中頻度語、低頻度語の3種類に分け、このうち、中頻度語がそのテキストに深く関連した語であることを示した¹。

この流れを汲む最近の常套手段は、TF.IDF法[2]である。この方法は、あるテキスト集合が与えられた時、あるテキストに対するあるタームの重要度（そのテキストの内容とどの程度強く関連しているか）を、次式で計算する。

$$w_j^i = tf_j^i \cdot \log \frac{N}{df_j}$$

tf_j^i = テキスト D_i におけるターム T_j の出現回数

df_j = ターム T_j が出現するテキスト数

ここで、 N はテキスト集合に含まれるテキストの数を表す。こうして得られた重要度を用いて、テキストの内容を近似的に表現する「表現」を作成する。例えば、重要

¹ 高頻度語はいわゆる機能語で、多くのテキストにおいて高い頻度で現れる。

度がある閾値以上のタームからなるターム集合や、それぞれのタームの重要度を要素とするベクトル（タームベクトル）が、この近似的表現となる。これらは、いずれも、タームの集合という形でテキストの内容を把握するもの、と考えることができる。

(b) 局所的理解

もう一つの方法は、いわば、「理解できる部分だけを理解する」ことによって、内容を把握する方法であり、典型的には、文パターンを用意し、それに合う文だけを解析（抽出）する方法である。

例えば、与えられた新聞記事が、新製品発売についての記事であるかどうかを判定する問題（テキスト選別）を考えよう。この場合、次のような文パターンを用意し、これに一致する文を探せばよい。

<メーカー> は<製品>を発売した。

<メーカー> は<製品>を販売する。

<メーカー> は<製品>の販売を開始した。

これらのパターンと一致する文が記事の先頭の数文中に存在すれば、この記事は新製品発売に関する記事であると判定してほぼ間違いがない。

これらのパターンと一致する文の記事から抽出すれば、それは重要文抽出による要約生成となる。また、抽出した文から、パターンに含まれる変数（<メーカー>と<製品>）に対応する部分だけを抽出すれば、情報抽出となる。

このような局所的理解が可能であるのは、次の理由によると考えられる。

1. テキストには、その中心的内容を端的に表す部分が存在する。
2. 情報の種類を固定すると、それを表す典型的な表現が存在する。

このような理由により、限られた文パターンに一致する文だけ进行处理することによっても、あるレベルの内容把握が可能となる。

(2) テキスト検索

検索エンジンは、もはや、ワールドワイドウェブにとって不可欠なものとなった。これを支える中心的な技術は、テキスト検索技術である。

システム側から見た場合、解くべき問題は、次のようになる。

テキスト集合の中から、与えられた検索要求（どのような内容のテキストがほしいか）に適合するテキストだけを取り出す。

システム設計における最大のポイントは、検索要求とテキストとの照合をどのような表現上で行なうかということである。これは、「照合をどのような理解のレベルで判定するか」と言い換えてもよい。つまり、検索要求とテキストの理解のレベルをどこに設定するかということである。

現在、多くの検索エンジンが実用に供されているが、上記のような理解のレベルから見ると、それらのほとんどは、ターム集合という理解のレベルを用いており、この点において同一タイプのシステムと考えて良い。このタイプのシステムは、おおよそ、以下のような方法で実現されている。

まず、検索対象となるそれぞれのテキスト（ウェブページ）をターム集合に変換する。これには、TF.IDF法などを用いればよい。次に、それぞれのテキストから得られたターム集合をまとめ、一つのインデックス（転置インデックス）を作成する。このインデックスは、それぞれのタームがどのテキストと関連づけられているかを表すものである。このとき、それぞれのテキストに対するタームの重要度を表す数値を付加しておいてもよい。一方、検索要求も、ターム（とブール演算子を組み合わせたもの）として表現され、システムに入力される。これを検索質問と呼ぶ。システムは、検索質問に合致するテキストを前述のインデックスを利用して求め、それを出力する。前述のタームの重要度が利用可能な場合は、これを考慮して、ランキング処理を行なってもよい。以上が、検索エンジンの実現法の概略である。

このような実現方法を取る現在の検索エンジンは、次のような問題がある。例えば、検索エンジンに対して、「機械翻訳」というキーワードを入力した場合を考えよう。このとき、利用者が求めているのは、おそらく、「機械翻訳」に関する情報である。これに対して、システムが行なうことは、「機械翻訳」というターム（あるいは文字列）を含んでいるテキストを見つけ出すことである。たとえ、機械翻訳に関する情報が書かれていても、そのテキストに「機械翻訳」というタームが使われていなければ、そのテキストを見つけ出すことはできない。システムが行なっているのは、情報検索ではなく、あくまでもテキスト検索なのである。

なお、テキスト検索のより詳細な説明は、文献[3]を参照されたい。また、各種検索エンジンの説明は、文献[4]が詳しい。さらに、検索エンジンをうまく使う方法については、文献[5]が参考になる。

(3) テキスト分類

テキスト検索が検索エンジンの実現技術として大々的に利用されているのに対し、テキスト分類のインターネット関連での応用は遅れており、検索エンジンの検索結果を分類するサービスが一部始まっているに過ぎない。

ウェブページの自動分類を実現し、ヤフー(Yahoo!)のようなウェブディレクトリを自動生成しようという試みは存在するようであるが、今のところ成功していないようである。

現在のテキスト分類は、テキスト検索とほぼ同じ技術に立脚している。すなわち、

1. 分類したいカテゴリをあらかじめ設定し、それに対する（できるだけ多くの）サンプルテキストを用意する。
2. 各カテゴリに属するサンプルテキストのそれぞれを、TF.IDF法を用いてタームベクトルに変換し、それらを足し合わせることによって、そのカテゴリに対する代表ベクトルを作成する。
3. 分類したいテキストも同様にタームベクトルに変換し、このベクトルと最も良く似た代表ベクトルを持つカテゴリを見つける。このカテゴリが、そのテキストの分類カテゴリとなる。

抽象的に考えるならば、テキスト検索とテキスト分類は、どちらもテキスト集合を分割するという問題である。その違いは、以下の2点に集約される。

- ・ 検索はテキスト集合を2つの部分集合（関連するか否か）に分割するのに対し、分類は通常2つ以上の部分集合に分割する。
- ・ 検索は必要となった時点で部分集合への分割を行なうが、分類はあらかじめ後の利用を想定して分割を行なう。

なお、後の利用を想定した2つの部分集合への分割は、通常、選別（フィルタリング）と呼ばれる。

(4) テキスト要約

要約には、そのテキストを読むか読まないかを決定するスクリーニングのための要約(indicative abstract)と、そのテキストを読まずにその内容を把握するための要約(informative abstract)の二種類が存在する。現在の自動要約技術で作成できる要約は、前者のindicative abstractである。

インターネット関連の中心的応用は、検索エンジンの検索結果のそれぞれのURLに、短い（1、2文程度の）要約を付加することである。

現在の自動要約技術は、Luhnの研究[1]を端を発する重要文抽出法である。これは、以下のような手順でテキストから要約を抽出する。

1. テキストのそれぞれの文に対して、重要度と呼ばれる値を計算する。これは、その文がどの程度重要な文か（要約に含めるのにふさわしいか）を表す指標である。

2. 重要度の高い文を、与えられた制限が許す限り抽出し、それらを出現順に並べて出力する。

ここで問題となるのは、どうやって各文の重要度を決定するかという問題である。これには、主に、以下の6種類の情報が用いられる。

1. 手がかり語による方法

重要な文には、それを示すような手がかり語（例えば、英語では、"significant"、"impossible"、"hardly"など）がしばしば存在するので、これを利用する。

2. 重要語による方法

文中に多くの重要語（TF.IDF法などで計算する）が現れる文を重要な文とみなす。

3. タイトルを利用する方法

タイトルや見出しに現れる語を重要語とみなし、そのような語が現れる文を重要な文とみなす。

4. 場所情報を利用する方法

見出しの直後の文や、テキスト（あるいは段落）の先頭または末尾の文を重要な文とみなす。

5. 文間の関係やテキスト構造を利用する方法

接続詞や照応表現などを手がかりにして、文間の関係（理由、例示、逆接、並列、対比など）を決定し、利用する。例えば、前文と例示関係にある文は、重要文とはなりにくい、など。

6. 文間のつながり情報を利用する方法

文や段落をテキストの一単位と考え、それらの間に関連の強さを定義する。多くの文（段落）と強く関連する文（段落）を重要な文（段落）とみなす。

これらのうち、1と5は局所的理解、2と6は統計的把握、3と4はテキストの構造的な情報の利用と考えることができる。

ワードプロセッサの機能の一つとして提供されている要約機能は、このような情報に基づき重要文を決定し、それらを抽出している。これに対して、検索エンジンの要約は、そのページの最初の128バイトを抽出したものをを用いるなど、もっと単純な方法を用いているようである。これは、大量のページの要約を作成しなければならない、ウェブページの多様性のため既存の方法がそれほどうまく働かない、などの理由によるものと考えられる。

なお、自動要約の解説については、文献[6]を参照されたい。

(5) 情報抽出

あるテキストに書かれている情報のうち、中心的な情報だけを抽出することを主題情報の抽出、あるいは、広く情報抽出(information extraction)と呼ぶ。先に示したように、例えば、新製品発売の新聞記事から、「どのメーカーが、何(製品)を、いつ、いくらで、発売したか」という情報を抽出することが、これに相当する。

情報抽出は、MUC (The MESSage Understanding Conferences) [7]と呼ばれるコンテストを中心に研究が盛んに行なわれてきた。

このコンテストが競う問題は、あらかじめ用意されたテンプレートを埋める形で情報を抽出することであり、それに必要な要素(人名、社名、日付、金額など)をマークアップすることを含んでいる。

情報抽出は、局所的理解がうまく働く典型的な例である。つまり、「抽出すべき情報が書かれている文だけが理解できればよい」。これは、通常、文パターンや手がかり表現を用いることによって実現される。さらに、抽出する情報のタイプ(人名、社名、日付、金額など)が限定されているならば、そのような要素の前後を解析するだけでも十分な場合も多い。このためは、それらの要素が正しくマークアップされていることが前提となる。

インターネット関連の応用において、情報抽出がどのように用いられるかは、現時点ではそれほどはっきりしていない。しかし、ウェブページからの情報抽出は、潜在的には需要があると考えられる。

(6) まとめ

現在のインターネット関連の応用で使われているテキスト処理技術は、そのほとんどがインターネットへの応用とは独立に研究されてきた、既存の技術である²。

上記に示した以外に、例えば、ウェブページの機械翻訳などの応用があるが、これも既存の機械翻訳システムに少し手を入れたシステムが使われており、新しい技術が使われているわけではない。

今後、インターネットのためのテキスト処理がどのような方向に進んでいくのかを予測することは非常に難しい。以下に、筆者が注目している方向性を示す。

1. 句を中心とした処理

ターム(語)を中心とした現在の内容把握技術に限界があることは明らかである。対象テキストの量が多くなると、タームは十分な弁別能力(絞り込みの能力)を持たなくなる。一方、文の解析技術が、低品質なテキストに対して、高速かつ安定して使えるようになるまでには、まだ時間がかかると考えられる。そこで、ター

2 唯一の例外は、そのテキストがどの言語で書かれているかを自動判定する言語判定技術であろう。

ムと文の中間の句（フレーズ）を処理の中心とするという考え方が生まれてくる。句をきちんと扱うことができれば、例えば、「機械翻訳の方式」、「機械翻訳の歴史」、「機械翻訳の研究者」などを区別できることになる。

2. 形式種別の把握

ウェブページをすべて「テキスト」として均一に扱うのは、あまりにも野蛮である。そのページがどのような種類のページなのか（個人のホームページ、企業のホームページ、製品紹介のページ、リンク集など）を判定し、それぞれに合った処理を適用する必要がある。また、ページ種別判定と上記の句を中心とした処理と組み合わせると、「大学のリンク集」などでウェブページを探すことが実現できる。

3.5.3 情報の自動編集

我々は、1993年頃よりテキスト処理技術を利用したインターネット関連の応用システムの研究を開始し、現在までその研究を継続して行なっている。我々の研究の要点は、あらかじめ情報を適切な形に編集しておくことによって、人間の情報収集や情報理解を支援することにある。

(1) 電子ニュースの自動ダイジェスト生成

我々が「編集」というものに注目するきっかけとなった研究は、ダイジェストの自動生成の研究である。

この研究では、特定のニュースグループのダイジェストを自動的に生成することに取り組み、2つのシステムを試作した。

1. fj.meetingsのダイジェスト自動生成[8]

fj.meetingsは、会議の開催案内や論文募集案内が投稿されるニュースグループである。このニュースグループの記事群から、会議に関する中心的な情報（会議名、開催日、開催場所、締切）を抽出し、カレンダー形式のダイジェストを提供するシステムを作成した。

2. fj.wantedのダイジェスト自動生成[9]

fj.wantedは、売買広告や各種の質問（情報を求む）が投稿されるニュースグループである。それぞれの記事から、中心的な内容を表す一文を抽出することにより要約を作成し、それらをカテゴリ毎（売ります、買います、など）に整理したダイジェストを提供するシステムを作成した。

システム実現の中心技術として、1では情報抽出を、2では自動要約と自動分類を用いた。

この研究の過程で、我々は、「もしこのダイジェストが利用者にとって便利だとするならば、それは何のおかげなのだろうか」という疑問を抱くに至った。ダイジェストを作るということは、一体どういうことなのだろうか。ダイジェストの作成によって、オリジナルの情報群にはない、何か新しい情報を作り出しているのだろうか。

これらの疑問について考えるうちに、我々は、「編集」がキーワードであることに気づいた。

もし、ダイジェストが使いやすいとするならば、それは「編集」のおかげである。ここで、「編集」とは、利用者とその目的を想定し、それに合った形に情報を加工する処理の総称である。

こうして、電子ニュースのダイジェスティングの研究は、「編集」により焦点を当てた自動編集の研究に発展することとなった。

(2) 質問応答集の自動編集

自動編集の最初の問題として選んだのは、質問応答集(Frequently Asked Questions; FAQ)の編集である。我々が作成したシステム[10]は、fj.sys.sun及びcomp.sys.sun.adminから、Question-Answers Package (QA-Pack)と呼ぶハイパーテキストの形をとった質問応答集を自動編集する³。

(a) QA-Packの構造

自動編集されるQA-Packは、ニュースのスレッド（一つの質問記事とそれに対する応答記事群）を、内容に基づいて分類したものである。分類体系は、あらかじめ概念木（分類木）として与えられ、それぞれのスレッドは、概念木のいずれかの節点（概念）に分類される。

QA-Packは、4種類のウェブページから構成される。

目次ページ 概念木の最初の2段を示す（図3.5-1）

節点ページ 概念木のそれぞれの節点に対応するページ。その概念に関連した質問のダイジェストを表示する（図3.5-2）。

スレッドページ 一つの質問とそれに対する応答群に対するページ。上部に質問の要約と応答の要約（リード）、下部に質問記事本体が表示される（図3.5-3）。

応答記事ページ 応答記事を表示するページ。

³ <http://www-sato.jaist.ac.jp:8000/faq/>

これらのページは、ハイパーリンクによって結合されている。

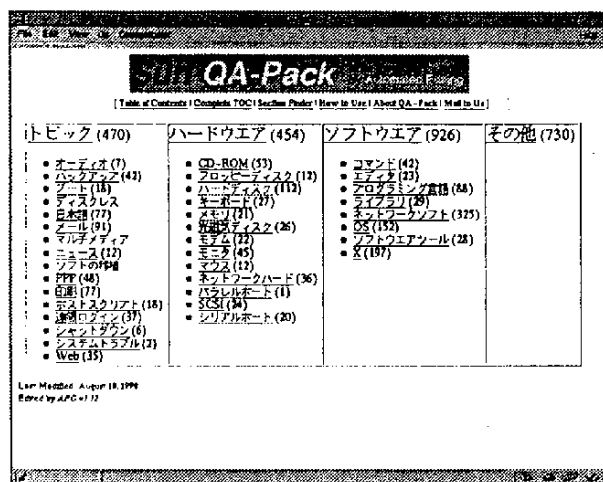


図 3.5-1 目次ページ

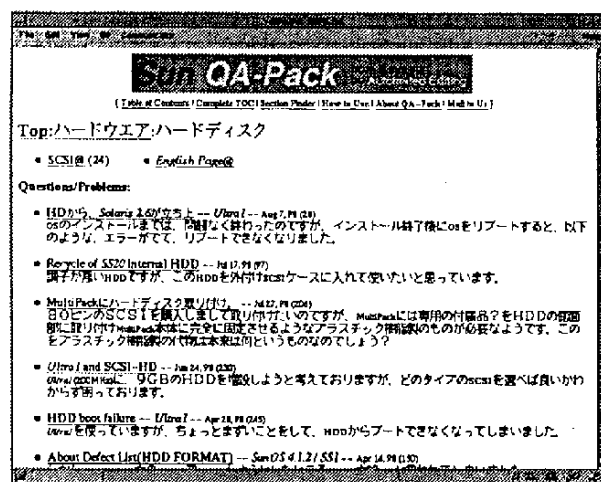


図 3.5-2 節点ページ

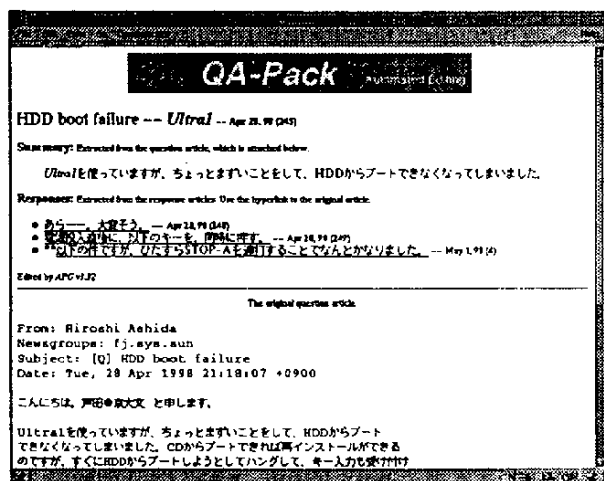


図 3.5-3 スレッドページ

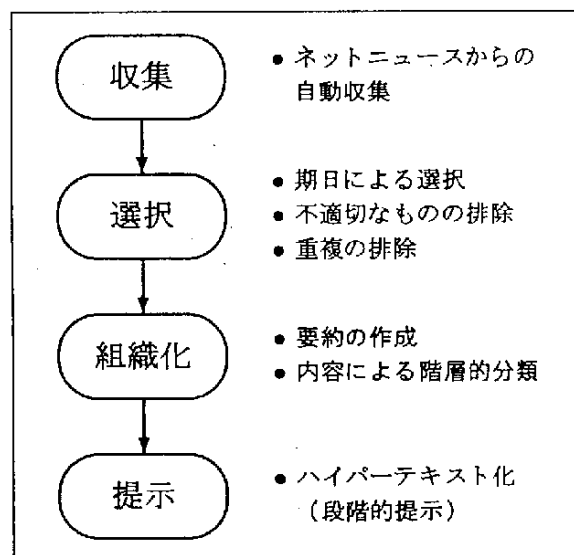


図 3.5-4 QA-Pack自動編集システムの概要

(b) 自動編集システムの概要

システムの概要を図 3.5-4 に示す。QA-Packの編集のためには多様な処理が必要であるが、そのハイライトは、以下の二つの処理である。

要約の作成 それぞれのスレッドに対してその要約を作成する。

内容による階層的分類 それぞれのスレッドをどの概念（節点）に分類すべきか決定する。

(c) 要約の作成

QA-Packでは、それぞれのスレッドに対して、ヘッドラインとサマリと呼ぶ2段階の要約を採用している。ヘッドラインは、質問記事の内容を端的に表したもので、サマリは、それをもう少し詳しく説明したものである。ヘッドラインは、質問記事のヘッダーのSubjectをリライトすることによって作成するのに対し、サマリは、質問記事の本文の中から、最も重要だと思われる一、二文を抽出することによって作成する。

このサマリの抽出には、表層表現（特徴抽出）を手がかりとした方法を用いている。図3.5-5にその例を示す。この図において、下線が付加されている部分が、注目する表層表現である。この例の場合、最初の文は、挨拶・自己紹介の文だと判定され、その文はスキップされる。次の文において、状況説明（「～しているのですが」）と質問（「～出来るのでしょうか？」）という特徴が見つかり、この文が最も重要な文だと判定され、抽出される。この方法により、約80%の精度で、有用なサマリを抽出することができる。

#	文	特徴	抽出
1.	こんにちは、東芝システムテクノロジー@伊藤と申します。	(X^{28}, X^{29})	
2.	SS20のキーボードについて教えて頂きたいのですが、現在、SS20でSun Type 5キーボード（付属のもの）を使用しているのですが、これを106キーボードに交換する事は出来るのでしょうか？	(S^3, q^{17}, Q^{18})	✓
3.	SunのEWSはキーボードからマウスをつないでいるのでパソコンみたいに、適当に買って来てつなげるわけにもいかないようです。	(X^{32})	
4.	キーボードコネクタも特殊な気がします。	(X^{32})	
5.	どこかの周辺機器メーカーでSS用の106キーボードって売ってないでしょうか？	(q^{17})	
6.	どなたかご存知の方いらっしゃいましたら教えて下さい。	()	
7.	お願いします。	(X^{32})	

図3.5-5 表層的特徴を利用した要約文抽出

(d) 質問内容の自動分類

それぞれのスレッドが何に関係した質問であるかは、要約（ヘッドラインとサマリ）に現れる専門用語を用いて決定する。図3.5-6に例を示す。この場合、キーボードに関連する専門用語が2種類見つかるため、この質問（スレッド）は、キーボードに関連するものであると決定される。

この方法の精度は、専門用語辞書のカバレッジに強く依存する。専門用語辞書を適切に準備した場合は、80%以上の精度で正しく分類できる。

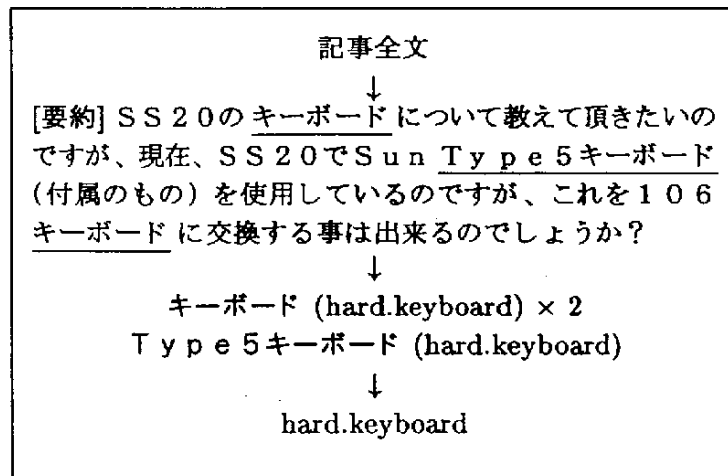


図3.5-6 要約と専門用語を利用した自動分類

(3) 現在の研究テーマ

編集のために必要となる作業は、図3.5-4に示したように、収集、選択、組織化、提示の4種類に大きく分類できる。これらのいずれにおいても研究すべきことが山積している。以下に、現在行なっている研究を示す。

- ・ インターネットからの情報収集の研究
ウェブ上に点在する教官公募情報を、検索エンジンなどを利用して見つけ出し、それらのダイジェストを作成する[11]。
- ・ 分類による組織化の研究
科学技術論文の表題を解析し、適切な分類カテゴリを割り当てる[12]。
- ・ 言い換えの研究
意味をほぼ保ったまま文を言い換えたり[13]、要約をリライトしてヘッドラインを作成する[14]。

(4) 自動編集と複雑系

自動編集の研究を、現在は例題を実現することを中心に進めているが、この過程において、いくつかの本質的な疑問が湧きだし、それらについて検討することを余儀なくされている。おそらく、この辺りに、自動編集と複雑系の節点があるのではないかと思われる。

(a) 情報とは何か

最も大きな疑問は、「情報とは何か」ということである。ここでの「情報」とは、情報科学／工学でいうところの「情報」ではなく、我々が日常的に使うところの「情報」である。編集は、単なる情報の等価変換なのだろうか。それとも編集は、何か新しい情報を生み出すものなのだろうか。

この疑問に対して、我々は「編集によって、潜在情報が顕在化されることがある」と考えてきた。しかし、最近では、「情報と処理は不可分である」という考え方に立った以下の説明の方が的を得ていると考え始めている。

「編集によって、人間の認識／理解の処理を軽減されるため、人間は、編集されたものをわかりやすいと感じる」

図3.5-7はそれを模式的に表したものである。我々人間が実際に接するものは、情報そのものでなく、情報を運ぶメディア（例えば、テキスト）である。そこから情報を得るためには、何らかの処理が不可欠である。これは、通常、認識とか、理解とか呼ばれているものである。編集は、この処理の一部を代替するものであり、その結果、人間が行なわなければならない処理が軽減されるため、人間はわかりやすいと感じるのである。つまり、わかりやすさとは、その処理の軽さの度合を指すものであると考えるのである。

「情報と処理は不可分である」という主張は、情報の理論を、情報を「モノ」として捉え理論化することはできないという主張である。処理というフィルターを通してしか情報を見ることができないというこの考え方は、一般に考えられている複雑系の考え方と相通じるところがあるのかもしれない。

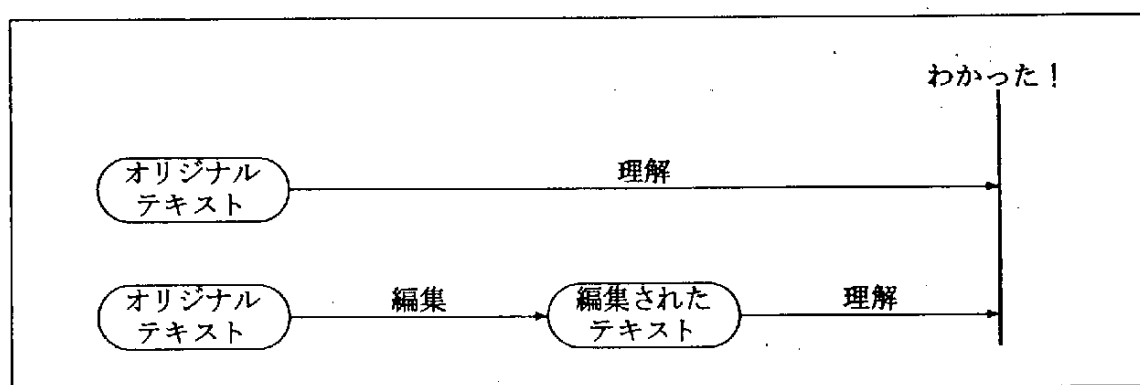


図3.5-7 編集による効果

(b) 言語と複雑系

「ことば」は情報を伝える最も汎用なメディアであり、画像などの他のメディアよりは、より直接的に情報を表現することができる。それゆえ、ことばについて研究す

ることは、その奥にある情報について研究することにつながっていくと考えられる。

書き言葉であるテキストは、「テキスト--段落--文--句--語」といった、複数のレベルの構造（多層構造）を持つ。そして、これらの層間には、強い相互作用が存在する。例えば、単語の意味は、それ自身だけでは決定できず、それが現れる文脈を含めた形ではじめて決定できる。句の意味、文の意味、段落の意味、テキストの意味も、同様である。それぞれの層の間の相互作用のうち、他の層からの影響が文脈依存性であり、他の層への影響が文脈を作り出すことへの寄与である。このような対応を考えれば、言語（テキスト）は、中島氏の言う複雑系に他ならない。しかしながら、言語処理においても、このような相互作用をうまく扱う方法は確立されているとは言い難い。

文脈依存性をどう取り扱うかは、依然として言語処理における大きな難問として残っている。

自動編集の研究は、ことば（テキスト）が非常に柔軟なメディアであることに気づかせる。例えば、テキストの要約は、元々のテキストの中心的内容を、より短いテキストで書き表すことであるが、これが可能なのは、テキストが一つの情報を複数の詳細度で伝えることができる（おおまかに伝えることもでき、また、詳細に伝えることもできる）からである。これは、上記の多層構造と強く関連している。また、言い換え（パラフレーズ）が可能なのは、一つのことを表すのに複数の異なった言い方が存在するからである。このような柔軟性や複雑さは、言語において本質的なものあり、コミュニケーションのための道具、あるいは、情報を伝達するメディアとしての重要な性質なのではないかと思われる。

参考文献

- [1] H. P. Luhn. The Automatic Creation of Literature Abstracts. *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 2, No. 2, pp.159--165 (1958).
- [2] Gerard Salton. Automatic Text Processing: *The Transformation, Analysis, and Retrieval of Information by Computer*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [3] 長尾真, 黒橋禎夫, 佐藤理史, 池原悟, 中野洋. 言語情報処理. 岩波講座「言語の科学」9, 岩波書店, 1998.
- [4] 原田昌紀. サーチエンジン徹底活用術. オーム社, 1997.
- [5] 江澤隆志 編. インターネット検索の技とコツ100本!. 宝島社, 1999.
- [6] 佐藤理史, 奥村学. 電脳文章要約術 ---計算機はいかにしてテキストを要約するか---. 情報処理, Vol. 40, No. 2, pp.157--161, 1999.
- [7] Defense Advanced Research Projects Agency. *Proceedings of Sixth Message Understanding Conference (MUC-6)*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc. 1995.
- [8] 佐藤円, 佐藤理史, 篠田陽一. 電子ニュースのダイジェスト自動生成, 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 10, pp.2371--2379, 1995.
- [9] 佐藤理史, 佐藤円. ネットニュースグループfj.wantedのダイジェスト自動生成. 自然言語処理, Vol. 3, No. 2, pp.19--32, 1996.

- [10] 佐藤 円, 佐藤理史. ネットニュース記事群の自動パッケージ化. 情報処理学会論文誌, Vol. 38, No. 7, pp.1225--1234, 1997.
- [11] 見館潔, 佐藤理史. ワールドワイドウェブ上の教官公募情報の自動編集. 情報処理学会第58回 (平成11年前期) 全国大会講演論文集(3), 4T--1, 1999.
- [12] 今井俊, 佐藤理史. 表題解析による科学技術論文の詳細分類. 情報処理学会第57回 (平成10年後期) 全国大会講演論文集(3), pp.211-212, 1998.
- [13] 近藤恵子, 佐藤理史, 奥村学. 「サ変名詞+する」の動詞への言い換え. 情報処理学会研究報告, Vol. 98, No. 82, 98--NL--127, pp.179--186, 1998.
- [14] Satoshi Sato and Madoka Sato. Rewriting Saves Extracted Summaries. In *Intelligent Text Summarization*, Technical Report, SS--98--06, American Association for Artificial Intelligence, pp.76--83, 1998.

3.6 知能も含めた生命現象構築の試み

稲吉 宏明 委員（電子技術総合研究所）

本節では、知能も含めた生命現象構築の試みとして、筆者の複雑系関連の研究例 2 つを次小節&次小節で紹介する。紹介する研究例の 1 つは(やや以前のものであるが)、「細胞もどき(celloid)モデルでの空間的秩序の創発」、もう 1 つは「神経細胞もどき(neuronoid)モデルでの時間差つき同期検出」である。前者は、細胞集団が細胞間相互作用を通じて多細胞生物個体としての構造／機能を創発させるプロセス構築を目指すものであり、他方後者は神経細胞を基本部品として設計し、基本部品集団の相互作用を通じて「脳／神経系のように振舞える系」を創発させることを目指している。両研究例は、基本部品(細胞もどきor神経細胞もどき)の振舞いが、更に下位の「低次部品(細胞間伝達物質等)集団」の振舞いから創発する、という点で共通している。両研究例を複雑系と見做すのは、この「低次部品集団」の個々の部品振舞いが単純であっても、集団全体としては必ずしも単純(≡予測可能)には振舞わない、という現象が見られるためである。

なお、本稿の記述は筆者の諸発表論文[1-4]から部分的に転載していることをはじめにお断りしておく。

3.6.1 細胞もどき(celloid)モデル [1][2][3]

本小節では(やや以前のものであるが)、「細胞もどき(celloid)モデルでの空間的秩序の創発」、もう少し具体的にいえば「昆虫の剛毛発現時の秩序形成の人工的再構成」を紹介する。

(1) はじめに

“人文字”をご存知であろうか？ 高校野球等で応援団がこれを作っているのを、見たことがありであろう。つまり 2 次元平面に配置されたたくさんの人間が各自、多種の色のプレートの一つを選び頭上に示すと、プレート集団全体が何らかのパターンを作り出す、というものである。

ここで思考実験をしてみよう。人文字の構成員を全員、“見ざる言わざる聞かざる”状態にしたらどうなるか？ 人文字では通常、時間とともにパターンが動的に変化する。パターンの変更は大抵、「全体の指揮者」の指示に従い行なわれるが、構成員は通信不能だから指示は届かず、パターンはバラバラになると予想される。故に、人文字においては、全体の指揮者が重要なことが判る。

次に多細胞生物の発生を考えてみよう。この過程では、単一の細胞である受精卵が分裂・分化等を繰り返しながら、ある細胞は筋肉細胞に、またある細胞は血液細胞に

と分化し、細胞集団全体のパターンを（別の見方をすれば秩序を）作り出している。ところがこの過程においては、全体の指揮者が細胞集団の外部に存在して、「細胞A、分裂せよ。細胞B、細胞B2に分化せよ」等の指令を下しているのではない。細胞集団内での相互作用を通じて、この細胞集団が自分たちだけで集団全体の秩序を生み出しているのである。

そこで、「全体の指揮者」なしに、構成員たちの相互作用のみを通じて、構成員たちだけで、人文字に相当するある種の秩序を作り出すことができないか？という可能性が考えられる。これを実現しようという試みが、本稿で紹介する内容である。目標として単純なパターンである剛毛の発毛分布パターンをコンピュータ上で人工的に再現させてみることにした。昆虫等の剛毛発生過程では、剛毛の空間分布パターンに規則性を示す。この規則性は、まわりに剛毛が発現していないところに最新の剛毛が現れるものである(図3.6-1参照)。

本研究は、「人工生命」とよばれる研究領域に属している。次節では、本研究を御理解戴くための予備知識としてまず、人工生命研究で最も重要な概念である「創発性(emergence)」について説明する。その後に、我々の研究である「細胞もどき」を紹介する。

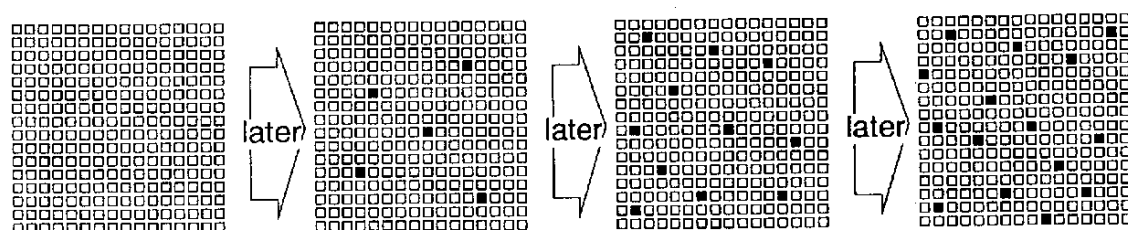


図3.6-1 昆虫の剛毛発現時に見られる剛毛の空間分布パターン
各小さな四角が一つの表皮細胞で、白い四角は無毛状態、それ以外は発毛状態に対応。

我々の研究を大雑把に言えば、次の通りである。まず、部品として「細胞もどき」を細胞間の局所的相互作用も含めて設計し、それらを多数2次元平面上に配置する(図3.6-2参照)。そして各部品に、剛毛を「発毛している、発毛していない」のいずれかを各時間ステップで選択させる。すると、全体の指揮者はどこにもいないにもかかわらず、マクロレベルでは剛毛の空間分布の規則性、即ち秩序が形成される。つまり、あらかじめ指定されてはいない部品集団全体の秩序を出現させることができたわけである。

このような局所的相互作用を通じての大域的な秩序形成の研究は、知能・意識というようなことにまであてはめて考え得るため、人工知能研究へのひとつのブレークスルーを与える研究にもなり得るものと期待される。

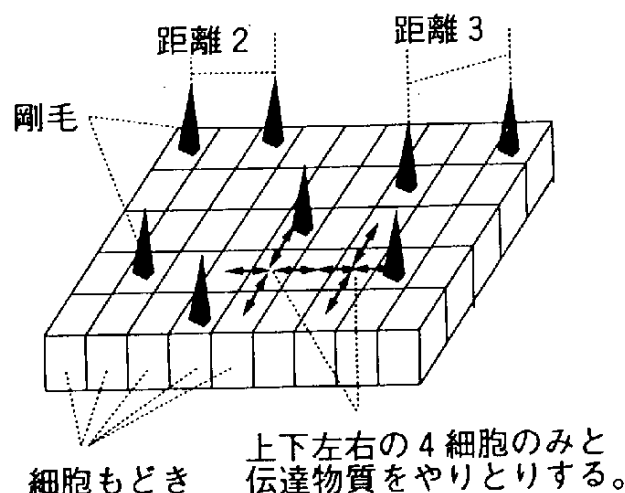


図 3.6-2 細胞もどき集団の概念図

2次元格子状に並んだ細胞もどきは、上下左右の4細胞のみと相互作用しながら、各時刻で「発毛状態・脱毛状態」の選択（二者択一）を行なう。どのような動作規則によれば、外から集団全体を見た時に毛の分布が秩序をもつことができるか？

(2) 人工生命の最も重要な概念：創発性

生物学の分野では、創発性(emergence)とは「進化中、予期できない新形質の現れること」を意味する。これに対し人工生命分野では、必ずしも進化にこだわらずに、「予期できない新形質の現れること」を創発と捉えているようである。後者の解釈で創発性を持っていると考えられる系の例は、自然界の階層構造に見られる。即ち、素粒子→原子→分子→高分子→細胞小器官(高分子集合体)→細胞→器官→多細胞生物個体→個体群→生態系....という階層構造である。これらの階層において、ある階層の性質はその下の階層の性質からは、必ずしも予期できない（原子の性質が判ったからといって、それだけで分子の性質がすべて判ることにはつながらない）。故に、「予期できない性質が現れること」を創発と呼ぶならば、自然界の階層構造の各階層は、その下の層の構成要素集団から“創発”したもの、と考えられる。予期できる・できないは、予期する人に依存するから、さらに別な創発の捉え方として、「設定されている・いない」を基準とする捉え方もある。つまり、「設計者が設定していない性質・振舞い・構造」が現れたならば、それは“創発”したものともみなすという立場である。

本稿では、主にこの立場で創発を捉えるものとする。ただし自然現象に関しては、設計者がいるわけではないので、この場合は予期できる・できないが“創発の基準”となる。

次に、人工的に作られた“創発性”を持つ系の研究例を示そう。USAのC.Reynoldsは、“鳥もどき”(bird-oid)を設計して、群れ現象を人工的に“創発”させることに成功した([5])。つまり、

・まとまって飛行せよ
とか

・前方に障害物があれば、二手に別れて回避せよ、
といった「全体の振舞い方の規則」は指定していないにもかかわらず、この振舞いを
“創発”させたのである。具体的にいえば、鳥もどきを簡単な3つの規則：

- (1) (局所的)近傍の仲間の速度ベクトルに自分の速度ベクトルをマッチさせる；
- (2) (局所的)近傍の仲間たちの重心と思われる方向に移動する；
- (3) (仲間を含めた)障害物との衝突を回避する；

に従う部品として設計し、この部品集合を相互作用させることにより、計算機内で、
“群れ”の“創発”に成功した。

従来のプログラムのようにトップダウンアプローチで群れ合成を考えるならば、全
体の振舞いつまり各鳥の飛行経路を逐次指定する必要があるが、鳥もどきの系ではご
く近傍の仲間との相互作用のみを通じて、群れの各鳥の経路が“創発”している。つ
まり、マクロレベルの(あるいは系外からの)指揮者なしに、自分たちだけで系の秩序
(群れ)が生み出されたと考えるのである(自己組織化)。

この研究のポイントは、部品の振舞いは設計者が設定したものであるが、部品の集
まり全体が如何に振舞うかは未設定という点である。

(3) 細胞もどきによる有機体もどきの探求

多細胞生物個体においては、その構成部品である細胞が多数集合することにより、
部品一つの振舞いと異なる新たな、部品集合全体の振舞いが“創発”していると考え
られる。この点と、前節の鳥もどきによる群れの創発をヒントとして、人工的に「細
胞もどき」を設計し、それを集めて多細胞生物のようなもの、つまり「有機体もどき」
を“創発”させようという研究に我々は取り組んでいる。

この研究の第一目標として、図 3.6-1 にあるような剛毛の空間分布パターンの人
工的再構成を選んだ。この選択の理由は、次の通りである：社会において人間は、多
様な職種に「分化」している。つまり社会を機能させるために「役割分担」をしてい
る。同様に多細胞生物を構成する多数の細胞も、[赤血球細胞、筋肉細胞、神経細胞]
等へと分化即ち「役割分担」を行なっている。役割分担がないと全体の機能が期待で
きなくなることから、分化現象は多細胞生物において、とても重要であることが判る。
社会に職種が多数あるように、細胞の役割あるいは細胞のタイプは多数ある。このモ
デルを作る際に、いきなり多数のタイプを考えると複雑になるから、スタートとして
単純な分化を考えると、それは「2タイプへの分化」である。故に、[発毛中・脱毛
中]の2タイプへの分化の起こる剛毛の形成過程を選んだ。

(4) 細胞もどきの動作設計

各細胞もどきに導入された主な仕組みは次の5点である：

- ・ N段階の内部状態；
- ・ 内部状態の確率的な変化；
- ・ 内部状態の変化時に起こる抑制物質の放出；
- ・ まわりから流入した抑制物質のまわりへの伝達；
- ・ まわりから流入した抑制物質の分解；

ここで抑制物質とは、「内部状態の変化確率を低下させる効果をもたらす物質」を意味する。以降で、上記の5点を少し詳しく説明する（なお、動作のからくりはやや込み入っていると思われるため、結果のみに興味のある方は、ここから(5)へ進んで戴いて構いません）。

各細胞もどきを外部から見ると、その状態は「発毛状態・脱毛状態」のいずれかである。しかしその内部状態は、

- ・ もうすぐ発毛しそうな脱毛状態；
- ・ 発毛したばかりの、発毛状態；
- ・ もうすぐ脱毛しそうな発毛状態；

等と、いろいろあってもおかしくない。そこでこれらを一般的に、N段階で区別しよう(図3.6-3参照)。そして各細胞もどきは、各時刻に「1～N」段階のいずれかにあり、

- ・ 1～N/2段階までは脱毛状態に、
- ・ (N/2)+1～N段階までは発毛状態に

各々対応させる($N \geq 2$)。さらに、まわりの細胞もどきとの相互作用がなければ、 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots \rightarrow (N-1) \rightarrow N \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \dots$ と循環的に段階を「昇進」としよう。昇進が確率的に起きることにすれば、各細胞もどきは、一定でない長さの「脱毛期間」と「発毛期間」を反復することになる。

このような細胞もどきを2次元に配置した時に、図3.6-1のような規則性のある発毛パターンができるためには、細胞もどき間にどのような相互作用が必要だろう？

(以降では簡単のため細胞もどきを「細胞」と略記する。)見込みのある仕組みの一つは、「発毛状態の細胞が、まわりの細胞の発毛を抑制する作用を持つ」という仕組みである。そこで次のような細胞間相互作用を導入した：

段階*i*にいる細胞は、段階(*i*+1)に「昇進」しようとしている。この昇進はある確率で起き、昇進に成功すると、その細胞からまわりに「昇進抑制物質」が放出される。

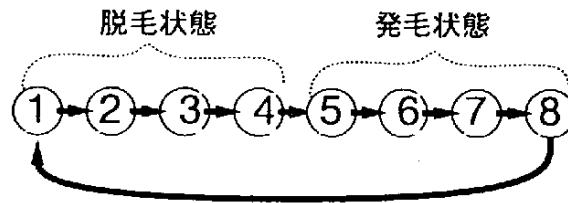


図 3.6-3 各細胞もどきのN段階の内部状態 (N = 8 のとき)

逆に近傍の細胞に「先を越される」と、そこから放出された昇進抑制物質により自分の昇進は抑制される。細胞同士の直接の物質のやりとりは、上下左右の4細胞とのみであるが、まわりから流入した抑制物質を、まわりに「横流し」つまり伝達することにより、抑制物質の「拡散」が起きる。「抑制物質の放出と拡散」のみでは物質が累積する一方となるため、「物質の消滅」も導入する。即ち、各細胞内に「物質分解装置」があり、流入してきた物質を常にある一定の確率で分解している（なお抑制物質について「放出した細胞から分解した細胞までの平均距離」を拡散距離と定義する）。内部状態の変化した細胞もどきから放出された抑制物質は、 $\{ \cdot$ となりの細胞に移動する（伝達）、 $\cdot$ 今いる細胞で消滅する（分解）、 $\cdot$ 移動も消滅もしない（無変化） $\}$ のいずれかの状態に、分解されるまで各時刻で遷移する。

上記のような「昇進抑制物質の放出・伝達・分解」という流れにより、細胞間相互作用が行なわれるものとする。自分が先に昇進すれば、まわりの昇進を抑制できるが、まわりに先を越されると、自分が抑制される。そして、「昇進段階」と脱毛・発毛状態は図 3.6-3 のように対応しているため、この「昇進相互作用」を通じて「脱毛・発毛の相互作用」が実現されるわけである。全細胞は「同一の昇進規則」に従い動作するが、昇進速度の確率的揺らぎ、およびまわりの昇進度合の違いによる影響を受けて、細胞間の違いが生まれる。そしてこの違いが、マクロ的に見ると発毛パターンの形成につながるのである。

なお、細胞もどきの持つパラメータは以下の通りである： $\{ \cdot$ 内部状態数 (N)； $\cdot$ （抑制を受けない時の）「昇進」確率； $\cdot$ 抑制物質の放出量； $\cdot$ 抑制物質1つあたりのもたらす昇進確率の低下量； $\cdot$ 抑制物質の分解確率； $\cdot$ 抑制物質の伝達（移動）確率； $\}$ 。次節に示す実験では $N = 8$ とし、他の確率値等は、試行錯誤により適切な値に設定した。

(5) 実験とその結果

縦100×横100細胞の計1万細胞が、各々上下左右の細胞と隣接(ただし上端と下端および左端と右端は連結)した状態での“発毛・脱毛の時間変化”実験を前節の動作規則に従うモデルにより行なった。

さらに対照実験として、同一数の細胞集合が、細胞間相互作用なしに、即ち図 3.6

-4のように、各細胞がランダムに、つまり回りと無関係に、自分勝手に発毛状態と脱毛状態間を遷移した場合の実験を行なった。2のy乗を(2^y)と表記することにする。図3.6-4にあるように、対照実験では、発毛確率は($1/2^{10}$)で固定し、脱毛確率を{($1/2^5$),($1/2^4$),($1/2^3$)}の3とおりに変化させた(これらは、状態遷移確率Pについて、 $P=(10:5)$; $P=(10:4)$; $P=(10:3)$;というラベルで区別されている)。

両実験とも“無毛状態”を初期状態とし、数千時間ステップの動作を行なわせた。細胞もときには多種の調節可能なパラメータが用意されているが、今回の実験では簡単のため、「昇進時に放出される伝達物質=昇進抑制物質」の放出量のみを変化させた(これらは拡散距離dについて、 $d=4$; $d=8$; $d=12$; $d=16$; $d=20$;というラベルで区別され、数値は想定される拡散距離を意味し、放出量は $d*d$ に比例している)。

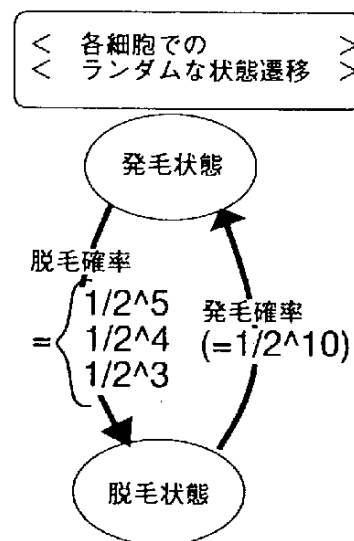


図3.6-4 対照実験における各細胞でのランダム遷移

実験結果を図3.6-5～図3.6-9に示す。図3.6-5、6、7については各ペアの上段が、相互作用なし(=対照実験)の場合、下段が相互作用ありの場合、となっている。

図3.6-5は、毛の本数の時間変動を示し、横軸は時間ステップ、縦軸は、1万細胞中の発毛細胞数を表している。

図3.6-6は発毛分布が比較的密な場合、図3.6-7は、やや疎な場合に対応している。これらはいずれも、左から順に{100,300,500}時間ステップにおける、発毛状況のスナップショットを示している。図3.6-8、9は各々図3.6-6、7の100時刻ステップにおける、各発毛細胞から最近傍の発毛細胞までの距離の分布を示している。距離分布図の横軸は、最近傍の発毛細胞までの距離で、縦軸はその距離にある毛の頻度(本数)である。ちなみに、X本の全ての毛が距離dで等間隔に並んだ状態では、距離分布の棒グラフはいわゆるデルタ関数的になる。つまり、距離dでは値xをとり、距離d以外では値ゼロの棒グラフとなる。図3.6-10にこのような秩序状態を無秩序状態との対比で示す。

上記一連の図から、対照実験として行なった相互作用なしの場合、距離分布の棒グラフが『広く低い』ため、疎密の変化が大であるのに対し、細胞間の相互作用ありの場合、距離分布の棒グラフが『狭く高い』ため疎密の変化が小となっていることが解る。つまり細胞間に相互作用を導入したことにより、相互作用がない場合に比べ、より高い秩序が出現している（なお、図3.6-9の破線の分布は、本来は図3.6-10のようなポアソン分布となるべきであるが、毛の本数つまりサンプル数が約150本と少ないため、誤差の影響が大となったものと考えられる）。

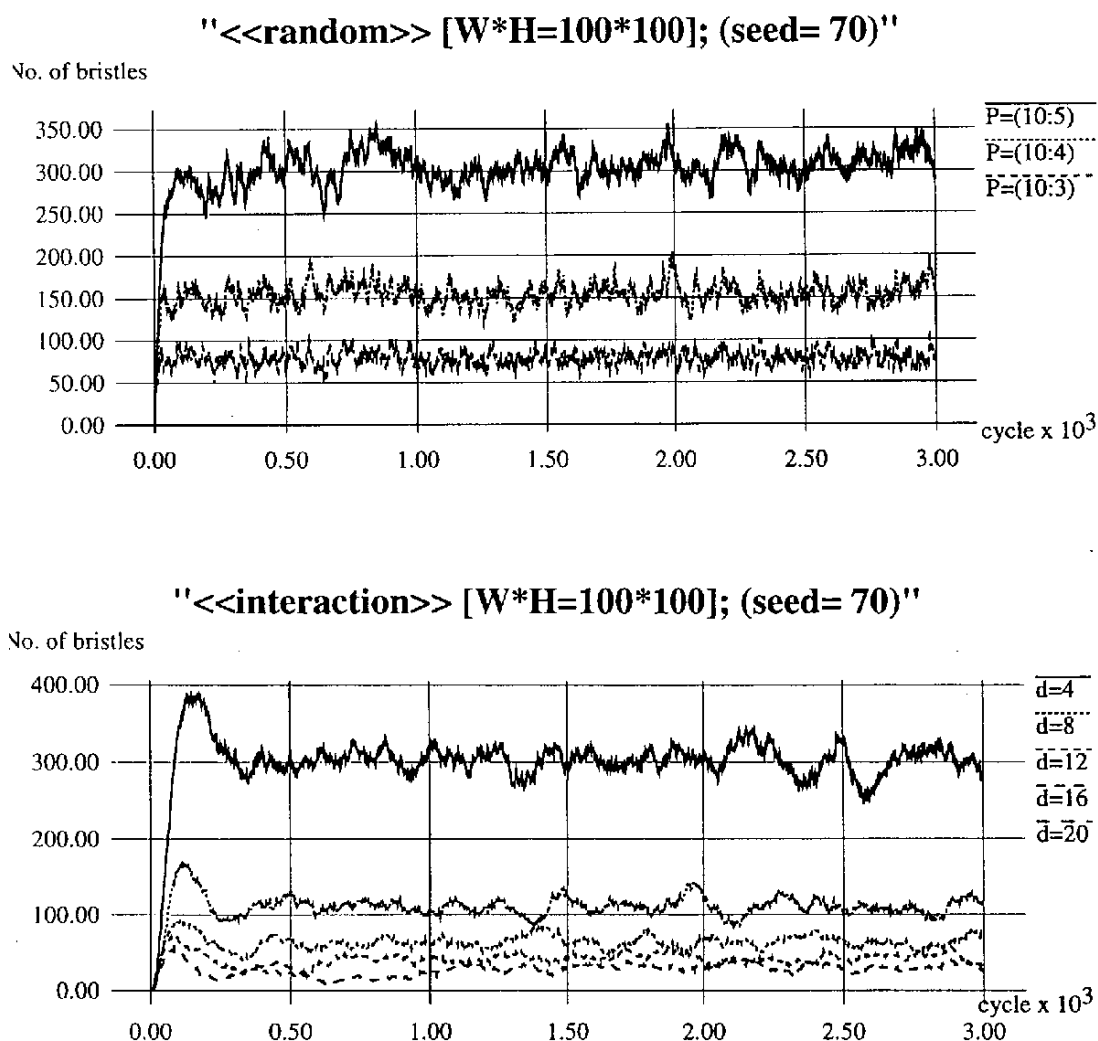


図3.6-5 毛の本数の時間変動
(上段=対照実験=相互作用なし;下段=相互作用あり)
横軸は時間、縦軸は1万細胞中の毛の本数

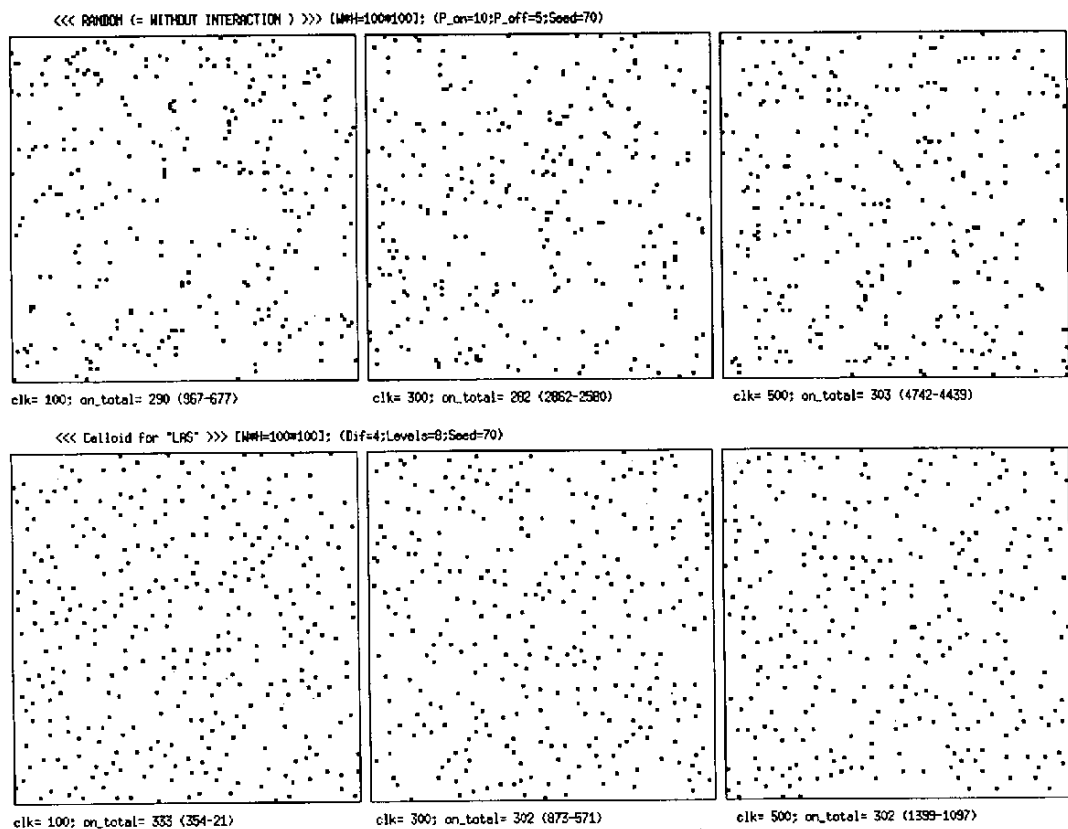


図 3.6-6 3つの時刻ステップにおける発毛分布:やや密(約300本)の場合
(上段=相互作用なし,下段=相互作用あり)100x100の1万細胞で、黒点は発毛細胞に対応。左から順に
100,300,500時刻ステップでの発毛分布；毛の本数は順に、290,282,303本（上段）、333,302,302本（下段）

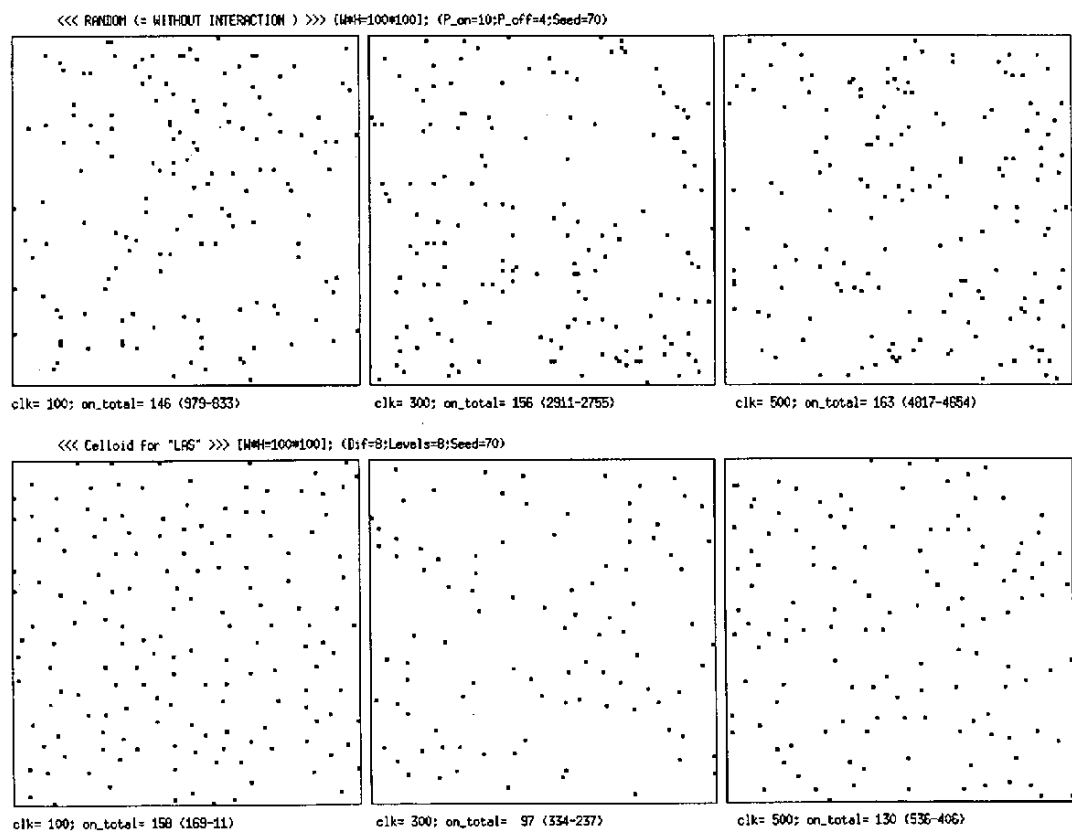


図 3.6-7 3つの時刻ステップにおける発毛分布:やや疎(約150本)の場合
(上段=相互作用なし,下段=相互作用あり)100x100の1万細胞で、黒点は発毛細胞に対応。左から順に
100,300,500時刻ステップでの発毛分布；毛の本数は順に、146,156,163本（上段）、158,97,130本（下段）

distribution of dist-to-the-nearest: interaction model vs. random model

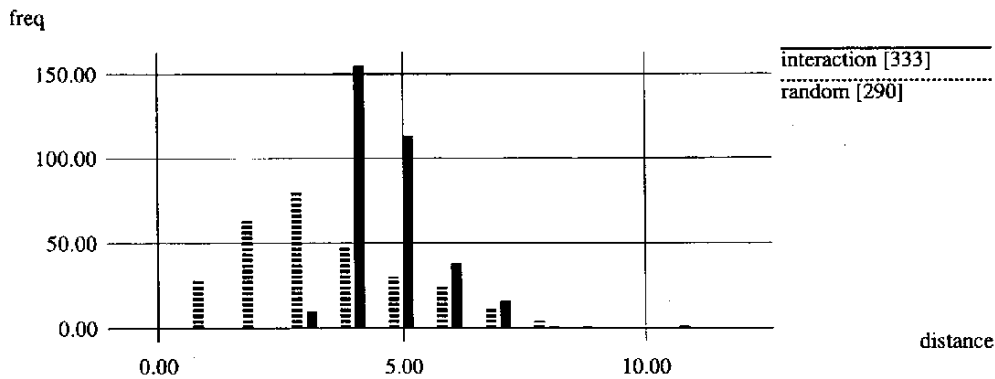


図 3.6-8 毛の間の距離の頻度分布で見る相互作用の効果:やや密(約300本)の場合
(破線=相互作用なし,実線=相互作用あり)横軸は最近傍の毛までの距離,縦軸はその頻度

distribution of dist-to-the-nearest: interaction model vs. random model

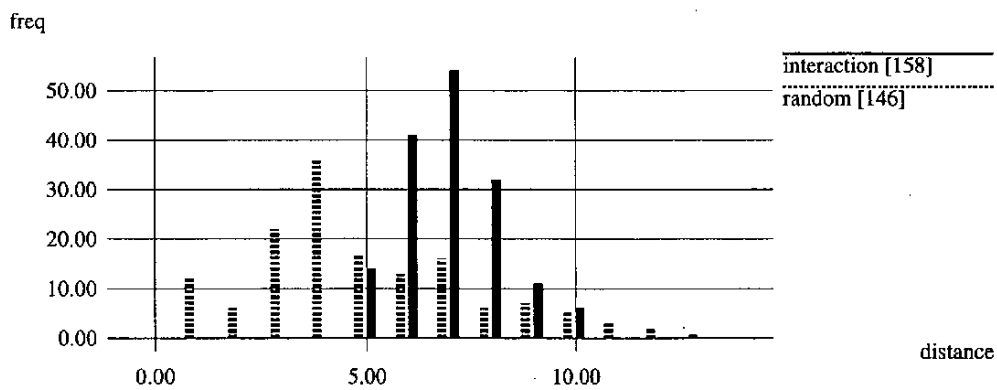


図 3.6-9 毛の間の距離の頻度分布で見る相互作用の効果:やや疎(約150本)の場合
(破線=相互作用なし,実線=相互作用あり)横軸は最近傍の毛までの距離,縦軸はその頻度

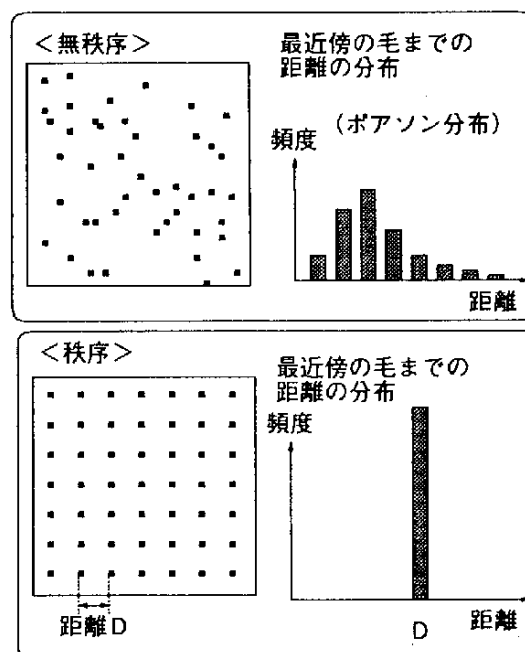


図 3.6-10 秩序状態(下段)と無秩序状態(上段)との対比
各左は、図 6、7 に対応する発毛パターンで、各右は、図 8、9 に対応する「毛の間の距離の頻度分布」を示す。

(6) 今後の展望

局所的規則に従い動作する「細胞もどき」集団において、生物学の知識をヒントとした相互作用を導入することにより、この相互作用がない場合よりも高い秩序（剛毛の空間分布の規則性）が集団に出現することを示した。

今後はより高度の秩序形成をめざし、知性のある人工頭脳に近づけるべく研究を推進する予定である。

実際の生物の脳・神経系の構造・機能を考慮すると、

- ・神経細胞ひとつのみでは脳・神経系の機能は果たせない;
- ・神経細胞が多数存在しても、それらがバラバラにもしくは自分勝手に動作しては、脳・神経系の機能は果たせない;
- ・脳・神経系は単一タイプの細胞で構成されているのではなく、多様なタイプに分化した神経細胞の相互作用の結果として、脳・神経系の構造・機能が発現している;

等の点から、このアプローチにより、人工頭脳構築に貢献できるものと期待している。

3.6.2 神経細胞もどき(neuronoid)モデル [4]

(1) はじめに

知能や意識は、神経細胞集団の相互作用により創発する性質であると考えられる。筆者らは現在"neuron-oid" (=神経細胞もどき)と名付けた研究に取り組んでおり、この研究では部品としてneuron-oidを設計し、この部品集団(=neuron-oid系)での相互作用を通じて人工的な知能／意識の創発を目指している。

本小節では、1つのneuron-oidでの「複数入力間の同期検出」について紹介する。なお、ここで示される重要な概念は、

- [1] 「後シナプス応答」と「前シナプス出力」の分離、
- [2] "trading synapse"仮説、
- [3] "receptors darwinism" 仮説、

の3つである。

(2) 同期の重要性、および同期検出可能なneuron-oidモデル

脳での情報統合に関連した重要な問題として「バインディング問題」と呼ばれる問題があり、「ニューロン集団の同期」がその解になり得る、という考えが示されている。

る(例えば[6])。他方、従来のニューラルネットがどちらかといえば「静的な多数決原理」に基づいているのに対し、最近、文献[7][8]のような研究が注目され始め、これらは「動的な多数決原理=同期性」を重視するものといえよう。

筆者は、以前「発火現象の創発」を目指したが、その後「発火そのもの」よりも「発火決定プロセス」の方が重要と判明し、同プロセスを重視した修正版を示した。同修正版は「同期検出が可能」であり、その概要を以下に示す：

始めにモデルの概念的説明を図3.6-11に示す。まず、

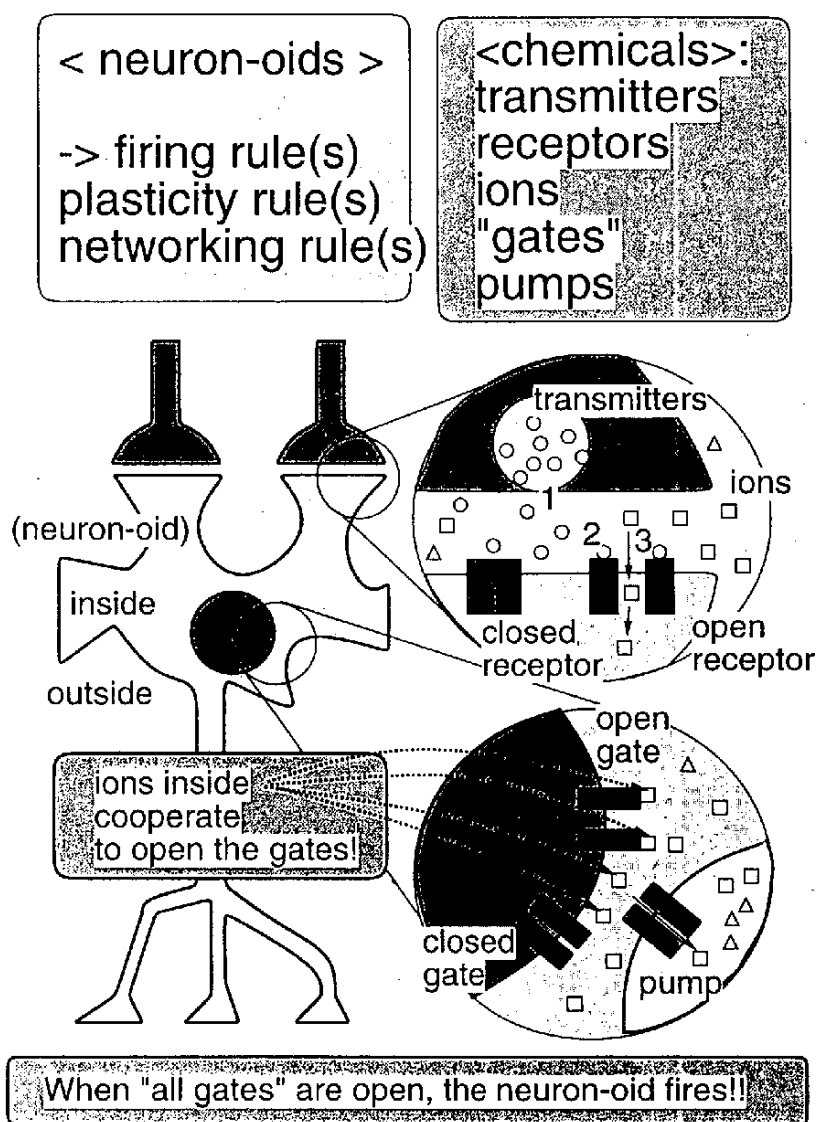


図3.6-11 neuron-oidの発火「決定」の概念的説明図

- [1] 「伝達物質=(neuro)transmitter」が放出され、
- [2] 伝達物質が「レセプタチャネル」に作用することによりチャネルが開き、
- [3] イオンが流入可能となる。
- [4] 流入したイオン集団が、協調的に "Gate-slots" に作用し (cf.受精直前の精子集団 (=ions)vs.卵子膜(=gate-slots))、もし、 N_G 個の全gatesが「同時に」"open"状態となればその細胞は発火する(図3.6-13)。各gateは、{閉、半閉(複数状態あり)、開}のいずれかの状態にあり、流入イオンの衝突等により状態遷移する(オートマトン..図3.6-13、図3.6-14)。

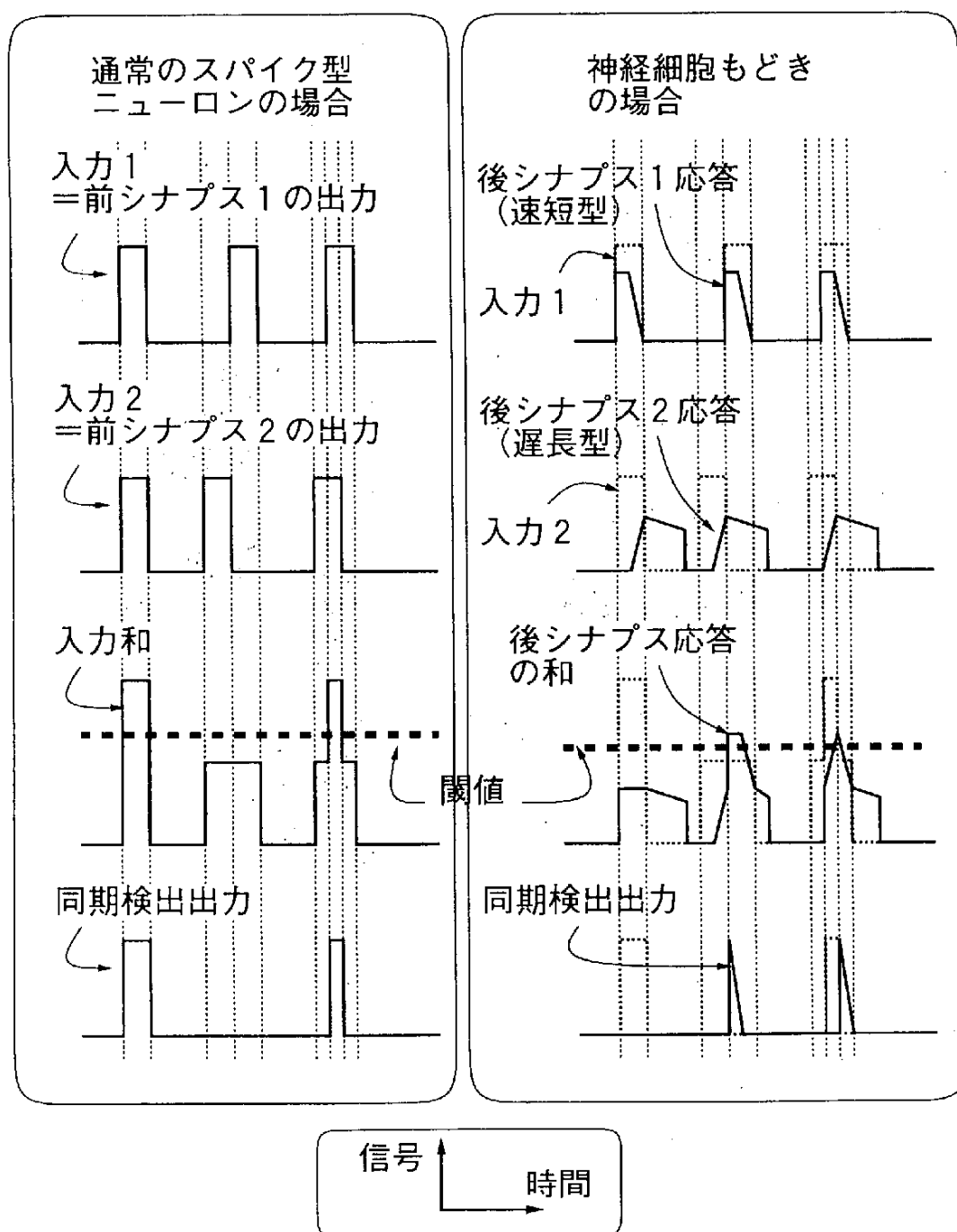


図3.6-12 同期検出の概念図

またイオン種によってgateに及ぼす作用は異なり、抑制効果をもたらすイオン種はgateが開状態となる確率を低下させる。(ここでN_Gがしきい値的な効果をもたらすと期待できる。)

本モデルの重要な点のひとつは、「後シナプス応答」と「前シナプス出力」の分離がなされている点である。

自然界には「多様なタイプのレセプタチャネル」(図3.6-15)で、NやP₁等の遷移確率の異なるものに相当が存在し、これらを本モデルに取り込むことにより、図3.6-12右のような「多様な時間ダイナミクスの後シナプス応答」が生成可能となる(この点で本モデルは、図3.6-12のように、文献[7]等のスパイクングニューロンと「異質の同期検出」が可能となる)。

なお、「小流量の蛇口集合を用いて穴の空いたバケツを溢れさせるには、同期が必要(cf.図3.6-13)」のアナログでおそらくほぼ自明であろうため、同期検出に関しては以上とする。

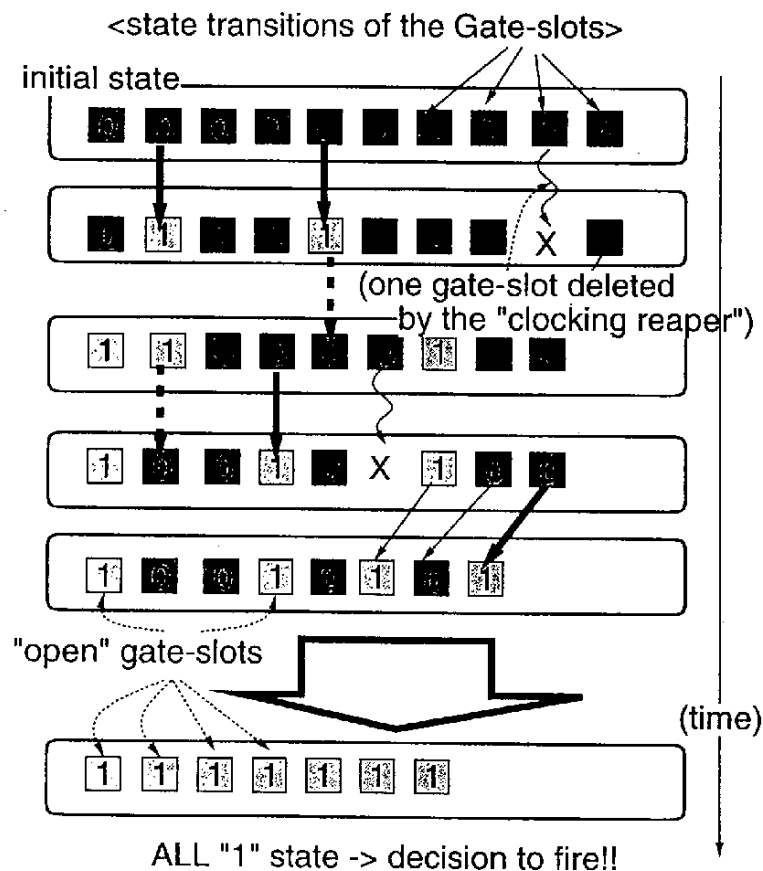


図3.6-13 ゲートスロット集団の状態遷移

<"Gate-slot" automaton ("comb")>
 initial state open state

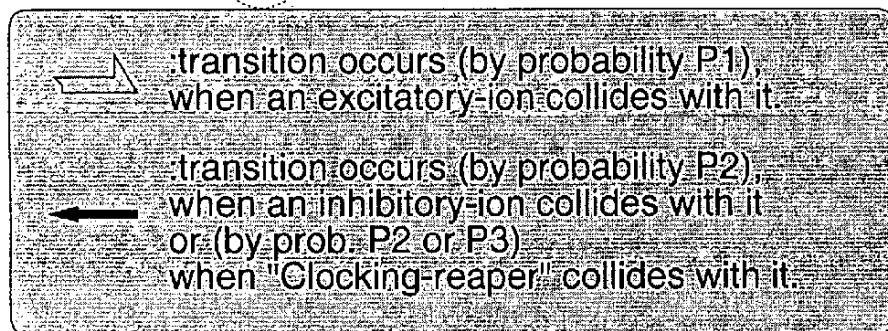
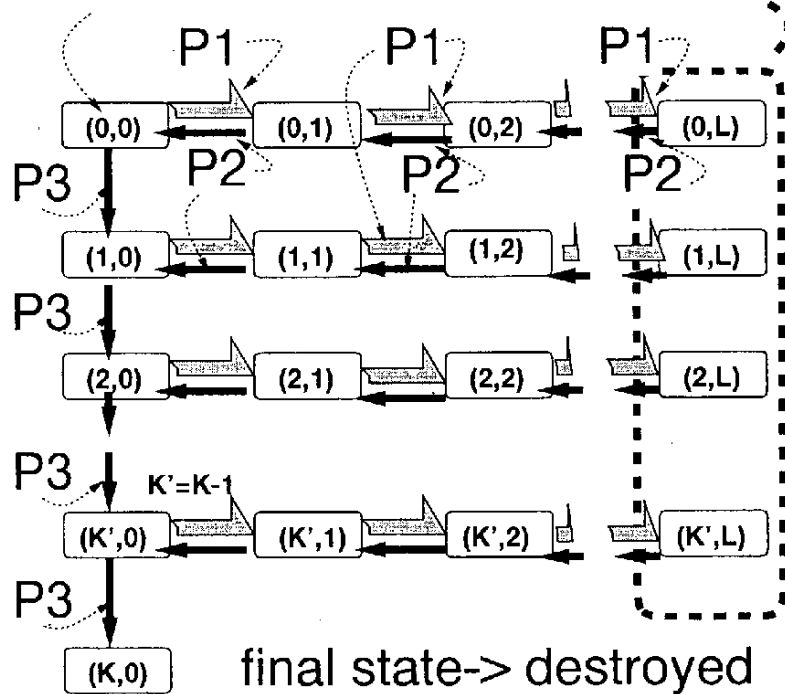


図 3.6-1 4 ゲートスロット 1 つの状態遷移

<"Receptor" automaton ("ladder")>
initial state open state

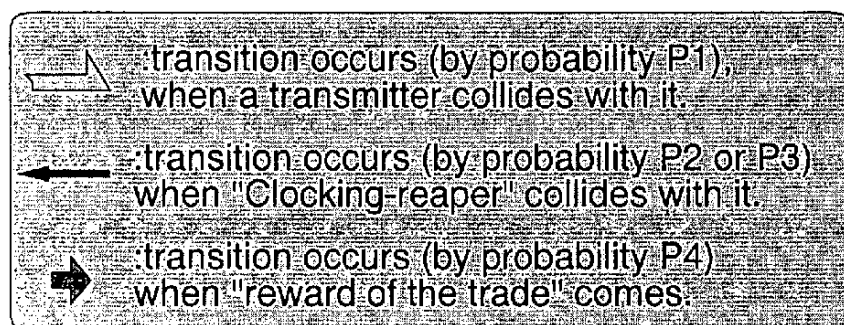
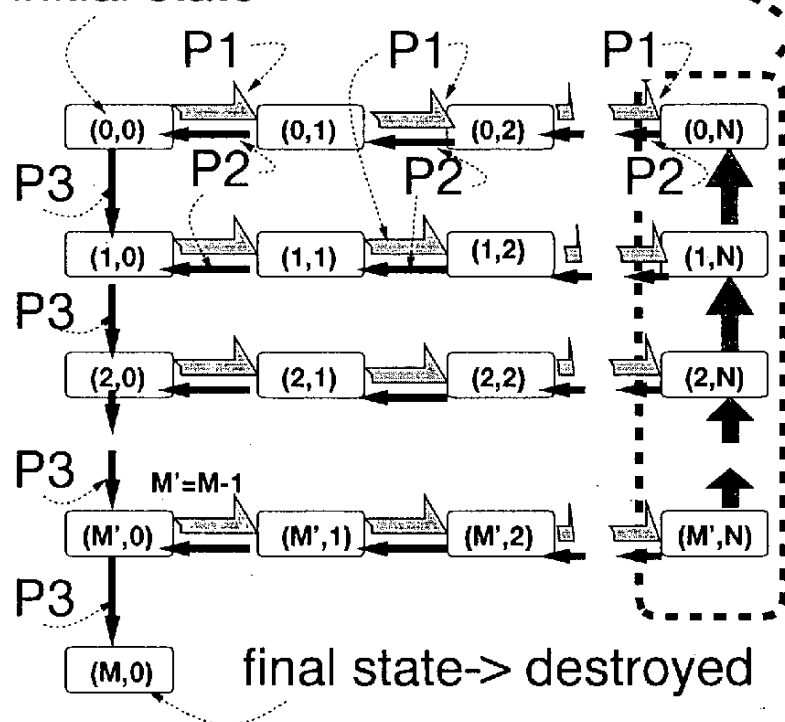


図 3.6-15 レセプタチャネル 1 つの状態遷移

(3) 同期学習に関連する 2 仮説

同期のタイミングの調節／学習に関係する 2 つの仮説：

- [1] "trading synapse" 仮説;
- [2] "receptors darwinism" 仮説;

を順に説明する。

[1] "trading synapse" 仮説 (図 3.6-16)

シナプスにおいて送信側&受信側の 2 者間で、取引(trade)的プロセスが行なわれている、とする仮説…… 「神経伝達物質」が「送→受向きの商品」に相当し、「後シナ

プス側ニューロンの発火により、前シナプス側に送られる(仮説的な)逆行性因子」が「受→送向きの代金」に相当する、と捉えることにより下記のアナロジが成立する：(これらのアナロジは、"receptors darwinism"仮説=次項のような仮説／規則設定に役立つ。)

[(1)] 送側の発火過剰 → (商品の)供給不足発生

[(2)] (前発火、後未発火)= 代金不払い → 送側が撤退／衰弱

[(3)] (前未発火、後発火)= (代金払っても)商品不届き → 受側が撤退／衰弱

[(4)] (前発火&後発火)= よい商品(=情報)の取り引きで、流通増大 → 送受ともに強化(cf.Hebb rule)

<trading synapse hypothesis>

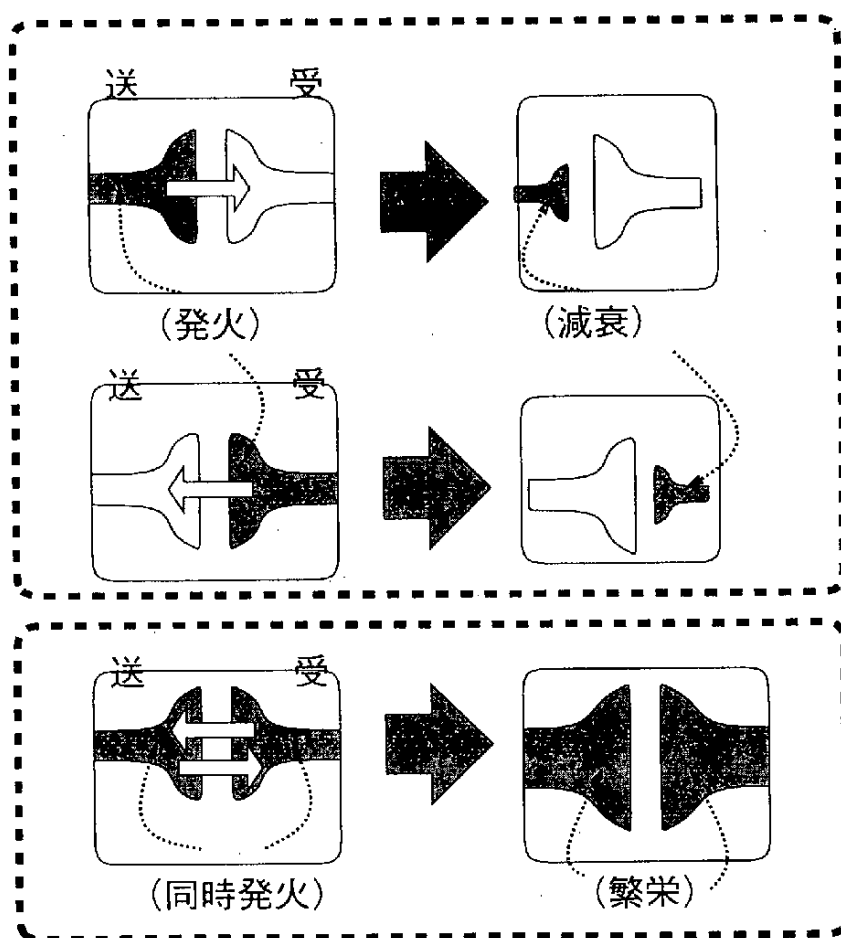


図 3.6 - 1 6 "rading synapse"仮説

[2] "receptors darwinism" 仮説 (図 3.6-17)

前項の「取り引き」において、受側(後シナプス)では「レセプタ」が「取り引きエージェント」に相当し、多種のレセプタ間の生存競争／自然淘汰が行なわれる、とする仮説。これにより、始め多種タイプのレセプタの共存するシナプスが、図 3.6-17 右のような異なる後シナプス応答に適応／分化可能。

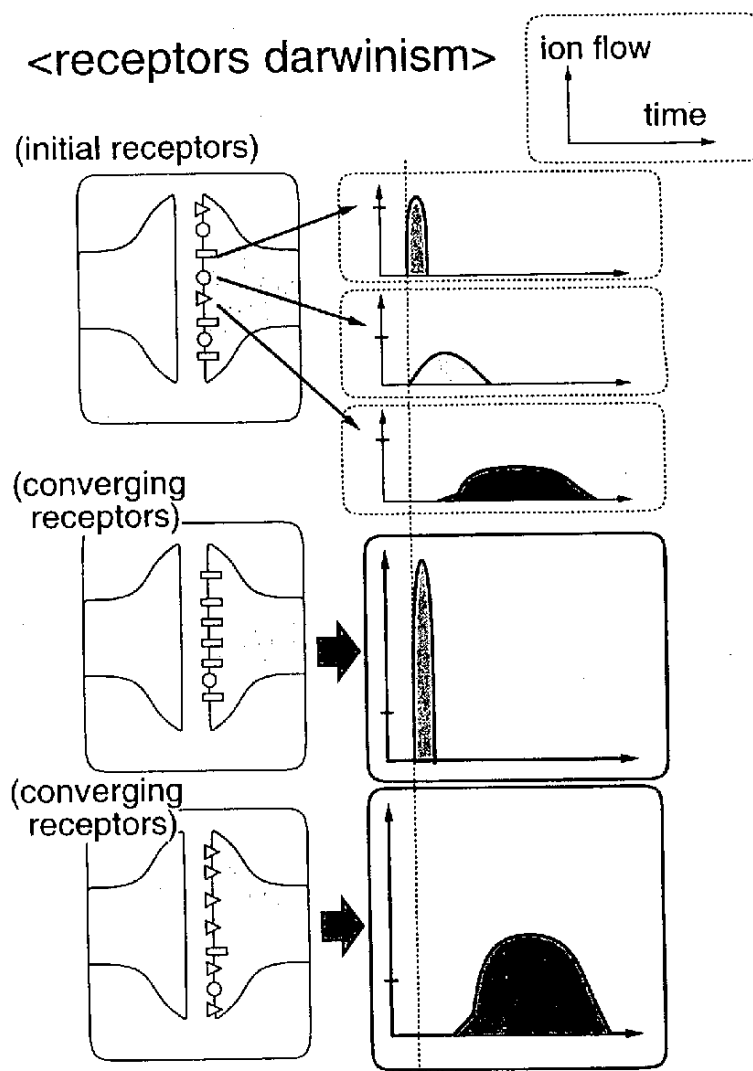


図 3.6-17 "receptors darwinism"仮説

(4) おわりに

本小節では、neuron-oidの重要機能の一つである(「時間差つき」)同期検出に関してそのアイデアを示した。

参考文献

[1] H Inayoshi: "Simulating Natural Spacing Patterns of Insect Bristles Using a Network of

- Interacting Celloids", R. Brooks, et.al. (eds): "Artificial Life IV", MIT Press (1994), pp.295-300.
- [2] H Inayoshi: "Artificial Spacing Patterns in a Network of Interacting Celloids", Y. Davidor et.al (ed): "PPSN-III (Lecture Notes in Computer Science # 866)", Springer-Verlag (1994), pp.365 - 374.
- [3] 稲吉：電総研ニュース 533号 (1994.6), pp.8-13
- [4] 稲吉、他：「'neuron-oid'系における創発的情報処理(第3報)：'neuron-oid'での入力間の同期検出」情報処理学会 第58回全国大会講演論文集, 2-251 ~ 252.
- [5] Reynolds C.W.: "Flocks, Herds, and Schools: a Distributed Behavior Model", Computer Graphics 21(4), pp. 25-34, (1987).
- [6] Singer W. : "Neuronal synchronization: A solution to the binding problem", Llinas R & Churchland P.S. (ed.) "The mind-brain continuum", MIT press, 1995.
- [7] Maass W. and Bishop C.M. (eds.), "Pulsed Neural Networks", MIT press, 1998
- [8] F. Rieke, et.al, "Spikes: Exploring the Neural Code" MIT press, (1996)

4. 海外動向調査

4. 海外動向調査

4.1 米国調査 I : 平成 9 年度実施

中島 秀之 委員長 (電子技術総合研究所)

1998年2月12日から20日にかけて、スタンフォード大学、ゼロックス・パロアルト研究所、サンタフェ研究所における複雑系関連の研究者を訪問し、討論を行なったのでその結果を報告する。主目的地はやはり複雑系のメッカ、サンタフェ研究所である。

4.1.1 Stanford 大学

サンフランシスコから車で30分程度。空港からバスもあるが大学構内へは入らない。

(1) Stanley Peters (Stanford)

言語学。現在、統計的手法に基づく情報検索を行なっている。大量のコーパスを機械処理し、単語間の共出現に基づく意味ベクトルを計算。これにより検索を行なう。

複雑系について討論し、David Beaver と Bernardo Huberman を紹介される。

(2) David Beaver (Stanford)

言語学。言語の発生をシミュレートするプロジェクトをKozaと共同で提案中。2つのデータベースがその内容を交換できるようなプロトコルを発見することが狙い。GP (genetic programming) [6]を使う。

このような通信には両者がレファレンスポイントとできる何かが必要である。人間の場合は体の仕組みと実世界が両者に共通なので、それを前提として通信が成立する。

Beaverらはデータベースの仕組み (用いる述語などは異なっても良い) の同一性と選択関数 (GAにおける子孫を残すための選択。神の立場から良いものを選択できる) による同定を使おうとしている。しかし、選択関数を結果ではなく、このようなデータベースの構造と言うような内部のものに適応するのは行き過ぎであると思う。

4.1.2 Xerox PARC

スタンフォード大学南側の丘陵の上。セキュリティはタイトで訪問者は受付で待たされ、ホストが向かえに来るまで入れない。帰りも出口までホストが付き添う必要あり。

(1) Bernardo Huberman (Xerox PARC)

SFIの創設に力を貸したメンバーの一人（設立ワークショップでも発表[5]している）ではあるが現在のSFIの活動には批判的。CA（cellular automata）は数学的には面白いがそれだけで、実用にはなりそうもない。例えば複雑度の指標が数学的に定義できたとして、それをどう利用するのかはよくわからない。

また、CAの多くの結果は同期に依存しているが、実世界にはそのような同期は存在しない。CAのシミュレーションを非同期に実行するとパターンが生まれない[2]。

また、最近は経済との関係を強調[3]しているとのこと。

4.1.3 Santa Fe Institute

Address: 1399 hydepark road, Santa Fe, NM 87501

WWW: <http://www.santafe.edu>

サンタフェ空港へはデンバーから日に数便の小型機（15人乗り程度）が出ているのみ。隣町のアルバカーキ空港から車で1時間程度だからその方が便利だと思われる。ロスアラモスへも車で1時間以内で行ける。ロスアラモスは原爆開発のためにわざわざ人里離れた場所を選んだという位の僻地であり、サンタフェも似たようなもの。ただし、夏は観光客でにぎわう。冬は雪が積もっているくらい寒い（シーズンオフで宿も安い）。

サンタフェ研究所は、更にサンタフェの町の北東約2マイルの岡の上にあり、周囲にはほとんど何もない。比較的小規模（スタッフを全部含めても50名に満たない）な研究所で、平屋の建物が3つだけから構成されている（現在建築工事が行なわれているので増える模様ではあるが）。e-mailによる訪問予約には大変渋い印象を受けた。おそらく皆忙しすぎるのであろう（例えば、Melanie Michel はビジネスマン向けのGAのチュートリアル準備中と言っていた）。

しかしながら、実際に訪問してみるとオープンな雰囲気のある場所である。周囲には何もないところなので、昼と3時のお茶はキッチンで用意される。皆こそこに集まってダベりながらお茶を飲んでいる。

現在の主な研究テーマ：

- ・ Adaptive Agent Simulation
- ・ Adaptive Computation
- ・ Biological Networks
- ・ Cognition
- ・ Computation, Dynamics and Inference
- ・ Computational Molecular Biology
- ・ Evolutionary Dynamics

- ・ Distributed Learning
- ・ Ecology
- ・ Economics
- ・ Evolution of Human Societies
- ・ Evolution of Language
- ・ Evolving Cellular Automaton Project
- ・ Evolving Local Rules for Global Problems
- ・ Origin of Life
- ・ Scaling Phenomena
- ・ Theoretical Immunology
- ・ Theoretical Neurobiology

(1) Jim Crutchfield

(コンタクトしていたが、結局南米出張中で会えず)

<http://www.santafe.edu/jpc/>

カオスと計算について研究しており、最近GAをより計算理論的にみるという仕事をしている。本拠地は、Physics Dep., Univ. of California Berkley。

(2) Chris Langton (SFI)

人工生命研究の創始者。以前はSFIの常駐研究者であったが、現在はSFIを辞めて外部メンバーの一人である。

Swarm (www.santafe.edu/projects/swarm) のデモをいくつか見せてもらった。Swarmはmulti-level programmingが可能なシステムである。システムの単位をswarm (群れ) と呼ぶが各swarmは更に小さいswarmの集団から構成できる (しなくても良い)。上位のswarmに群れに関する制約を書いて下位のswarmを制御することもできるし、上位には何も書かずに下位swarmの集団からの行動創発を用いることもできる。

現在、人類学的考証に基づいた村落の発生のシミュレーションを計画中とのことである。個人、家族、集落、村などをそれぞれswarmとして実装する。家族の構成swarmは結婚や出産、死亡などにつれて入れ替わるが家族自体はそれより長く存続する (しかしいずれ消えるかもしれない)。集落や村についても同様に構成要素は入れ替わる。村の単位になると比較的安定して長く続く。実際の地形 (サンタフェ周辺)、気温、降水量などのデータを基にして、穀物の収穫などによって集落が移動して行く模様のシミュレーションが行なわれている。

更にswarmによるデモをいくつか見せてもらった。

① Heat Bugs.

2次元のグリッド状の平面で動き回る虫のシミュレーション。

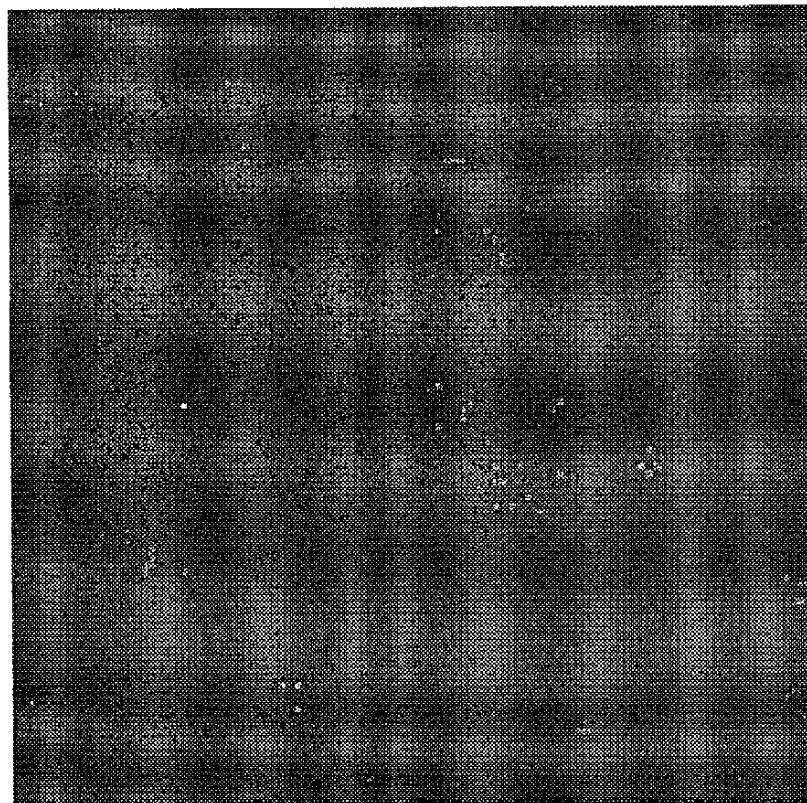


図 4.1-1 Heat Bugs

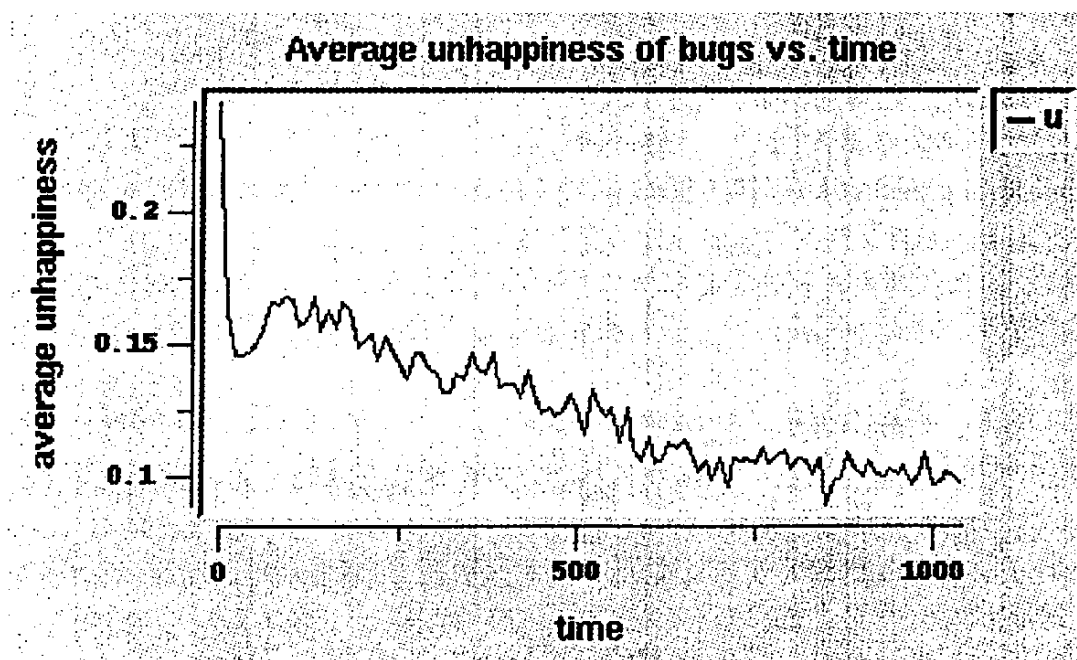


図 4.1-2 Heat Bugsの不幸度

各虫には好みの温度があり、又移動すると後に決まった量の熱を残す。好みの温度として環境温度より高いものを設定すると徐々に集まってクラスターを形成する。分散最適値探索問題の一種で、全体的な不満足度が図4.1-2のように時間と共に減少して行く。

シミュレーション中に個々の虫の設定を変更することが可能。低い好みの温度を設定すると皆で集団から逃げ回る。これは安定しない。

② 経済現象のシミュレーション

かなり単純なシミュレーション。エージェントの行為のフィードバックはなく、為替変動はランダム。各エージェントは複数(15)ある評価基準(傾向、ファンダメンタルズなど)のうちから、最近予測が的中していると思うものを選ぶだけ。各エージェントがどれくらいの数の評価基準を追跡するか(このセットはエージェントごとに乱数で選ばれる)を変化させることができ、例えば1に絞ると選好は変化しないし、全部にすると全エージェントが同じ動き(最適基準に集まる)をする。

もう一つフィードバック(つまり、エージェントの行為が相場に反映される)のある複雑なモデルも見せてくれたがLangton自身理解していない模様。

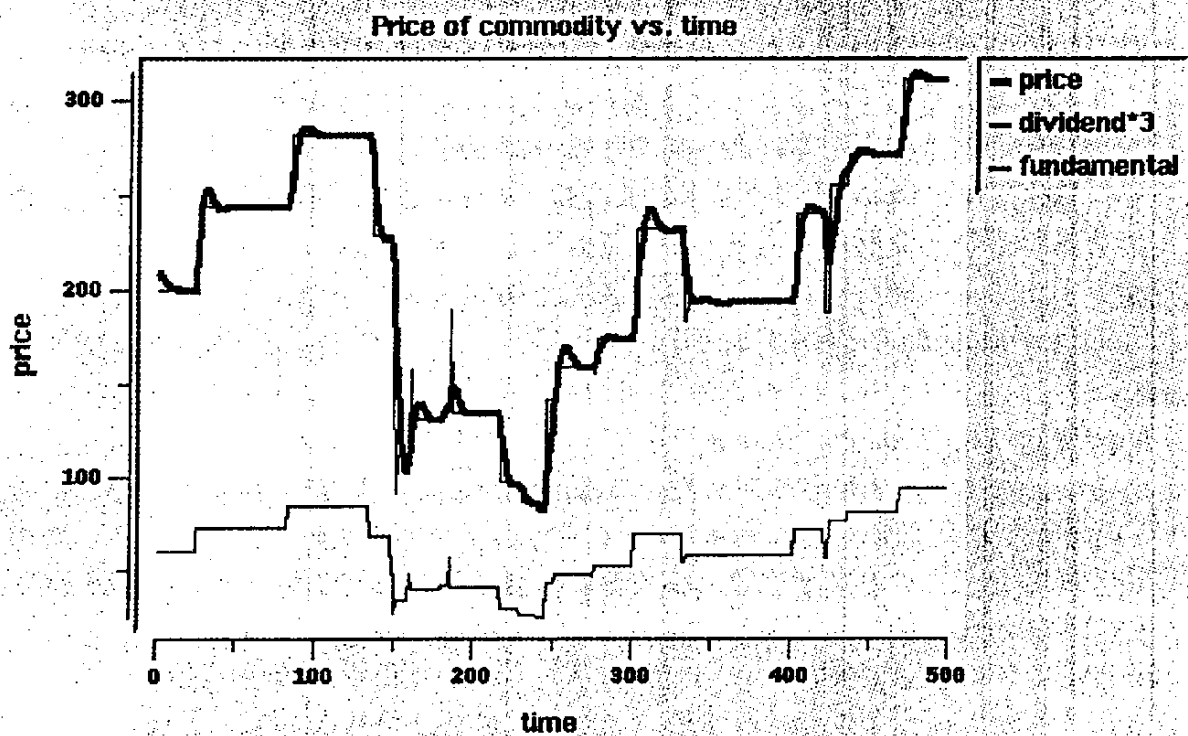


図4.1-3 経済現象のシミュレーション

③ チューリングマシンのテープ

2次元平面を動きながらテープを残していくチューリングマシンのヘッドのシミュレーション。他のヘッドの残したテープを別のヘッドが（あるいは自分が戻って）横切ることにより、テープが書き換えられることでヘッドの行動が変化する。

多くはランダムだが、たまに2つのヘッドが共生（互いにテープを書き換え合う）して面白い行動が創発することがある。

いずれのデモも実質は1層のswarmである。多層化はやはり困難を伴うとLangtonも言っていた。Swarmで下等生物をまるごとシミュレートしようとしているという噂があったが、それは遠い将来とのこと。そこに行くまでに様々な問題を解決する必要がある。

[感想]

Swarmは昆虫などの群の意味ではあるが、実際には人間の社会構造とか、生物の個体のように、集団に実体があるものに近い気がする。昆虫の群は個体の集まりにすぎないと考えられる程度の緩い結合しかしていないが、会社は組織としての明文化された規則を持っており、それ自体に強制力がある（法人として、法律的にも個人と同じような単位として扱われている）。Swarmの制約もこの規則のようなものである。一方昆虫の群にはそのような強制力を持つ単位が存在しない。（しかし、本当に群と会社は質の異なるシステムなのであろうか？異なるとしたら何が異なるのか？）

生物の個体も、構成要素の分子の行動記述だけでは不足で、細胞や内蔵器官の単位の実体の存在が大きい。これらの単位が（構成要素が変化するにもかかわらず）いかにして自分を維持しているかというのはシステム論の大きなテーマであるが、複雑系の研究の中心もこのあたりにあるのではないかと思う。

その意味では、swarmのように集団をやはりswarmとし、集団の規則をそこに書くという方法は短絡的な解決であるという気もする。

(3) Barry McMullin (英国に帰国)

<http://www.eeng.dcu.ie/~mcmullin>

Swarm projectでオートポイエシスの計算モデル[8][9]の研究をしていた。これは最初にVarelaらによって作られたFortranプログラムの再現である。あまり多くない数のセルによる反応シミュレーションで、システムの境界を自動生成するというもの。

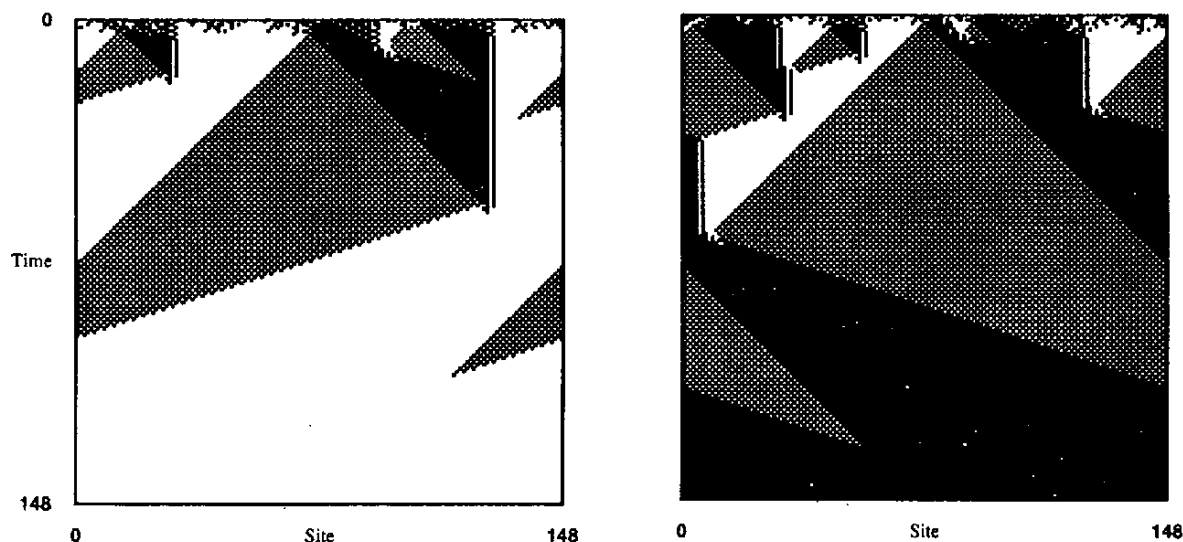
(4) Melanie Mitchel (SFI)

<http://www.santafe.edu/~mmm/>

Evolving Cellular Automaton Project のメンバーでもある。

このプロジェクトの面白い成果の一つにCAで大域的な計算をさせる試みがある。1

次元2状態CAで、白と黒のどちらの数が多いかという単純な計算であるが、多数決は全体的な性質で局所的に求めるのは不可能のように思える問題である。



左は白が多いCA、右は黒が多いCA。縦軸は時間軸で、上から下に時間が推移している。各々最終的には全体が多数派のセルの色で塗られている。途中で白・黒の反転が連続する領域が広がってそれが白あるいは黒の領域と出会って変化して行く様が見える。

図4.1-4 多数決を行なうCA

彼らはGP (genetic programming) を用いてCAの書き換え規則を進化させた結果、図4.1-4のように“白黒の反転が連続する領域”という新しい概念を導入して計算を行なう規則を発見した[1][7]。

[感想]

全体的な性質と局所的な計算との関係は重要なテーマである。しかしながら、今のところ、このような現象の理解にはGAのようなランダムな探索しか方法論を持っていないのが辛い。もう少し構成的にプログラムする方法はないものかと思う。

代案として、現在、多層のプログラミングについて考えている。個の動作のプログラミングと全体の動作のプログラミングを個別に行ない、両者を融合させる方法の追求である。全体の個への還元でもなく、個から全体の創発でもない、両者の相互作用の方法を発見する必要がある。

また、彼女の博士論文のデモを見せてくれた。これは人間の融通性をシミュレートする試みとして類比を行なうマルチエージェントシステムである。

Copycat [4]

abc → ijk

という類比があったときに

abd → ???

の答は無数にあるが、これが ijl になるとすると“右端の文字をアルファベットの1字後に置き換える”という規則で両者が説明できる。では、この類比の元で

aabbcc → iijkkk

aabbdd → ???

は何になるだろうか？

aabbdd → iijlll

今度は、“右端のペアをアルファベットの1字後に置き換える”という規則になる。
“文字” → “ペア” の置換えが起こっている。

abc → kji

abd → lji

の場合は“右端” → “左端”の置き換えである。

このような問題に応じた柔軟な規則の置き換えのために、“次の文字”、“前の文字”、“端”、“右隣”、“左隣”、“グループ”、“同じ”などの関係を探す個々のエージェントを用意する。これらはランダムに関係を探索するが、見つけるとその活性値が上がり、他の場所の同じ関係を見つけようとする。

この機構はマルチエージェントによるボトムアップ探索と、活性値伝播によるトップダウンフォーカスの両者から成り立っていると見ることができる。また温度（エントロピーと呼んだ方が良いと思うのだが）という全体の整合性の度合を導入しており、全部が同じ関係でマップされる程温度が下がる。温度がある値（探索中にランダムに変更される）以下になったところで探索が終了する。類比の問題はどちらかと言えば古いAIの問題であるが、上記の意味では複雑系処理の一手法とみなせる。

(5) Walter Fontana (SFI)

本拠地は、

Theoretical Chemistry, Institut für Theoretische Chemie und Strahlenchemie,
Universität Wien
<http://www.tbi.univie.ac.at/~walter/>

化学出身で、生命と計算について考えている。ラムダ計算を出発点として計算モデルの研究を行なっている。

化学反応： λ 計算

という対比において

生物化学：XXX

という高次の計算モデルを探している。chemical computingが化学を計算に持ち込んでいるのに対し、彼はその逆で、計算を生物化学に持ち込もうとしている。

分子反応はclosedである：反応に外的要因が入り込む余地がなく、反応が起これば結果は決まっている。一方、生体における反応連鎖はopenである：反応連鎖は様々な要因で断ち切られる。 λ 計算もclosedである。Milnerのパイ計算も同様に各プリミティブはclosedな事象である。これらのclosedな計算単位の連鎖を考えるとそこにはopenな要素が入ってくる。このような連鎖の数学的なモデルが欲しいとのこと。

(6) Working Paper

SFIではジャーナル (Artificial Life, Complexity) や本のシリーズの他に working paper を発行しているが、ほとんどwebから入手可能である。

<http://www.santafe.edu/sfi/publications/working-papers.html>

最近のもので面白そうなものをいくつか持ち帰った。

98-01-005

Eric Bonabeau, Guy Theraulaz, and Francois Cogne
The Design of Complex Architectures by Simple Agents

97-12-094 E

Joshua M. Epstein
Zones of Cooperation in Demographic Prisoner's Dilemma

97-08-076

Cristopher Moore and Timothy Boykett
Commuting Cellular Automata

97-08-075

Andreas Wagner

Causality in Complex Systems

参考文献

- [1] James P. Crutchfield and Melanie Mitchell. The evolution of emergent computation. In *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 92, pages 10742--10746, 1995. SFI Working Paper 94-03-012.
- [2] Bernard A. Huberman and Natalie S. Glance. Evolutionary games and computer simulations. In *Proc. Natl. Acad. Sci.*, volume 90, pages 7716--7718, 1993.
- [3] Bernard A. Huberman, Rajan M. Lukose, and Tad Hogg. An economics approach to hard computational problems. *Science*, 275:51--54, 1997.
- [4] Douglas Hofstadter. *Fluid Concepts and Creative Analogies*. Basic Books, 1995.
- [5] Bernard A. Huberman. Computing with attractors: from self-repairing computers, to ultradiffusion, and the application of dynamical systems to human behavior. In David Pines, editor, *Emerging Syntheses in Science, Proc. of the founding workshops of the Santa Fe Institute*, pages 167--174, 1987.
- [6] J.R. Koza. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press, 1992.
- [7] Melanie Mitchell, James P. Crutchfield, and Rajarshi Das. Evolving cellular automata with genetic algorithms: A review of recent work. In *Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Computation and Its Applications (EvCA'96)*, 1996.
- [8] Barry McMullin. Computational autopoiesis: The original algorithm. Technical Report 97-01-001, Santa Fe Institute Working Paper, 1997.
- [9] Barry McMullin and Francisco J. Varela. Rediscovering computational autopoiesis. Technical Report 97-02-012, Santa Fe Institute Working Paper, 1997.

4.2 米国調査Ⅱ：平成10年度実施

—The 6th International Conference on Computational Finance (CF99) 報告—

和泉 潔（電子技術総合研究所）

1999年1月6日から8日にかけてニューヨーク大学で開催されたThe 6th International Conference on Computational Finance (CF99) について以下に報告する。

4.2.1 概 要

(1) 概 容

CF99とは見ての通り、今流行りの金融工学の特にコンピュータなどを使った手法に関する学会である。複雑系の手法が社会科学の分野に使われるとしたら、新しい物好きのこの分野であろう。と、いうわけで、金融工学の分野で、複雑系がどのように見られているかを調べてきた。

(2) 全体的な感想

全体的な感想を先に言うと、「まだまだ」という感じであった。複雑系のアプローチと思える研究の数自体も少ないし、何よりも、ニーズの元である金融の現場が求めているものと、複雑系のアプローチの目的が、かなり掛け離れているように思えた。

(3) 発表論文の構成

先ず、数に関してであるが、今回の学会の論文は以下の3つのタイプに分られた。

1. オーソドックスな計量経済学、統計学的な手法を用いている研究。
2. 確率微分方程式を数学的に解こうとしている研究。
3. ニューラルネットワーク、GA、GP、マルチエージェントモデルなどのコンピュータシミュレーションを用いている研究。

数としては上のそれぞれ約1/3ずつであった。

・複雑系が関係するとしたら3番目のものであるが、複雑系のキモである、ミクロ-マクロ問題に言及して新しい理論を作ろうとしている研究はごく僅かであった。

- ・多くの研究ではコンピュータシミュレーションを、既存の金融工学にある式のパラメータをデータから推定するための道具としてしか使っていなかった。

(4) なぜ複雑系がうまく使われていないのか

上のようになってしまっている原因はやはりニーズの側にも関係ある。

- ・確率微分方程式を数学的に解いて用いている既存の金融工学の道具に対して、現場でも欠点が指摘されている。そのため新しいアプローチとして、進化的計算やマルチエージェントモデルにも、現場でも関心がありそうである。
- ・しかし、現場でのニーズは、既存の知識や理論を大幅に変えずに、複雑系の手法を含めた新しいアプローチを、小手先の改良に用いたいようである。まるで、ニューロ電子レンジやファジィ洗濯機のように。
- ・複雑系の手法は、単にパラメータの最適化を賢くするのではなく、基になる経済理論そのものを新しく作り替えるものであるのに、そこまでを視野にいられているような研究は2、3本しかなかった。

このままでは、例えば複雑系が金融工学に用いられても、一時の流行りで、ファジーやニューロの二の舞!?

4.2.2 ピックアップ論文

複雑系のアプローチから見ても、これは、と思えるおもしろい論文を2本紹介する。

(1) Technical Trading Creates a Prisoner's Dilemma

By Shareen Joshi (Santa Fe Insititute, shareen@santafe.edu) 他

(a) モデルの枠組み

市場に参加しているディーラーには、2通りの人がいると言われている。

ファンダメンタリスト：金利や貿易収支などのファンダメンタルズ(経済の基礎的な要因)を重視して、真面目に市場価格を予測する人。

チャーティスト：移動平均などの市場価格の過去の動きの時系列データ (チャート)から、いろいろ計算して市場価格を予測する人。

- ・上のどちらの予想方式を選択するかということを各プレイヤーの戦略にし、各予想方式を選択した場合の取引結果の資本を利得にして、N人のゲームとみなした。
- ・ゲームの利得(取引結果の資本)を、サンタフェ研究所の「人工株式市場」を使って計算した。

サンタフェ研究所の「人工株式市場」

- 確実に利息がもらえる(リスクフリー)な資本と、市場で値段が変わる資本(株)の2種類が存在。株は1次の自己回帰過程に従う配当がつく。
- 25人のエージェント。各々100個の予測ルールを持つ。

予測ルール:

$$IF(\text{the market meets state } D_i) \text{ THEN } (a = a_i, b = b_i)$$

そして、上のa、bを予測式に代入して株価 p_{t+1} と配当 d_{t+1} を予測。

予測式:

$$E(p_{t+1} + d_{t+1}) = a(p_t + d_t) + b$$

- 市場の状態 D_i は、チャートトレンドに関するものとファンダメンタルズに関するものとの2種類がある。

チャートトレンド：n 期間の移動平均やm 期前の値段との比較など。

ファンダメンタルズ：現在の価格がその基本価値に比べて高いか低いかな。

- 予測ルールを使って得られた予測値を基に取引を行い、需給から株価が決定される。
- 予測ルールをビット列にしてGAを使う。

(b) シミュレーション結果

その結果、表4.2-1の表わすように、ゲームは複数人の囚人のジレンマゲームの構造になった。

- ・全ての市場参加者がチャーティスト(囚人のジレンマゲームの裏切り戦略に相当)になるのがNash均衡。表4.2-1の状況A。

表4.2-1 シミュレーション結果:

あるエージェントが、他のエージェントの予測方式を知らずに、予測にチャートトレンドを含めるかどうかの決定表。利得は45回シミュレーションをした平均の期待資本量。標準偏差も表示されている。

	他の全てのエージェント	
	チャートトレンド 予測に使う (チャーティスト)	ファンダメンタルズ のみで予測 (ファンダメンタリスト)
あるエージェント チャートトレンドを 予測に使う (チャーティスト)	A: 113 ± 6.99	B: 154 ± 6.68
ファンダメンタルズ のみで予測 (ファンダメンタリスト)	C: 97 ± 6.68	D: 137 ± 5.10

- ・しかし、全ての市場参加者がファンダメンタリスト(囚人のジレンマゲームの約束を守る戦略に相当)になる方が利得が高い。表4.2-1の状況D。

これは、なぜか。

- ・他の全ての市場参加者がファンダメンタリストの時は、自分はチャーティストになった方が、配当の自己回帰性をうまく予測に利用できる。他のエージェントたちにとっても同様だから、全員がチャーティストがNash均衡。
- ・しかし、全員がチャーティストだと価格の動きが基本価値である配当から大きく解離することが多くなり、株価の自己回帰性が減少。従って予測困難になり、全員がファンダメンタリストの時よりも利得が低い。

現実の市場の簡単なモデルになっているのでは。

(2) Volatility Clustering in Financial Markets: A Micro-Simulation of Interacting Agents

By Thomas Lux (Univ. of Bonn, lux@iwi.uni-bonn.de) 他

(a) 金融市場の共通の特徴

1. Unit-root: 値動きを

$$p_t = \rho p_{t-1} + \varepsilon_t$$

で回帰したときに、 $\rho=1$ が棄却されない。時系列の定常性。

2. fat tail: 変動値の頻度分布が、平均近くが鋭く、平均から大きくはずれたところ(裾)の確率が高い。裾の部分がパレート分布

$$F(x)=1-ax^{-\alpha}$$

に従う。cf. スケーリング則。

3. volatility clusters: 株価やレートの変動値の分布は、そのままだと 自己相関は有意でないが、絶対値の自己相関は有意。cf. GARCHモデル。

(b) モデル

上記の特徴をシミュレートできる市場のマルチエージェントモデルを作った。

モデルの枠組み

・N人の市場参加者がおり、予想の仕方が

1. ファンダメンタリスト(n_f 人)
2. 買う気のある楽観チャーターティスト(n_+ 人)
3. 売る気の悲観チャーターティスト(n_- 人)

の3種類がある。チャーターティスト全体は $n_c = n_+ + n_-$ 人。

・それぞれの市場参加者は他の市場参加者に出会ったときにある確率で自分の予想の仕方を変える。

- 楽観チャーターティスト $\longleftrightarrow$ 悲観チャーターティスト:

$$\text{悲観} \rightarrow \text{楽観}: \pi_{+-} = \nu_1 \frac{n_c}{N} \exp(U_1)$$

$$\text{楽観} \rightarrow \text{悲観}: \pi_{-+} = \nu_1 \frac{n_c}{N} \exp(-U_1)$$

$$\text{但し、} U_1 = \frac{\alpha_1 x + \alpha_2 \dot{p}}{\nu_1}, \quad x = \frac{n_+ - n_-}{n_c}$$

ν_1 : 各市場参加者の学習頻度

$\frac{n_c}{N}$: チャーターティスト同士が出会う確率

x : 市場全体の楽観と悲観の片寄り具合

$\dot{p}$: チャートトレンド

を表わす。

つまり、市場参加者の意見の変化は、市場全体の多数意見とトレンドに左右される。

- チャーティスト ↔ ファンダメタリスト:

$$\text{ファンダメタリスト} \rightarrow \text{楽観}: \pi_{+f} = \nu_2 \frac{n_+}{N} \exp(U_{2,1}),$$

$$\text{楽観} \rightarrow \text{ファンダメタリスト}: \pi_{f+} = \nu_2 \frac{n_f}{N} \exp(-U_{2,1})$$

$$\text{但し、} U_{2,1} = \frac{\alpha_3}{\nu_2} \left\{ \frac{r + \dot{p}}{p} - R - s \left| \frac{p_f - p}{p} \right| \right\}$$

R: 他の資本の収益率

$$\frac{r + \dot{p}}{p} - R : \text{楽観チャーティストの利得}$$

$$s \left| \frac{p_f - p}{p} \right| : \text{ファンダメンタリストの利得}$$

を表わす。

つまり、意見の変化はそれぞれの予想の仕方による利得の差に左右される。
同様に

$$\text{ファンダメタリスト} \rightarrow \text{悲観}: \pi_{-f} = \nu_2 \frac{n_-}{N} \exp(U_{2,2}),$$

$$\text{悲観} \rightarrow \text{ファンダメタリスト}: \pi_{f-} = \nu_2 \frac{n_f}{N} \exp(-U_{2,2})$$

$$\text{但し、} U_{2,2} = \frac{\alpha_3}{\nu_2} \left\{ R - \frac{r + \dot{p}}{p} - s \left| \frac{p_f - p}{p} \right| \right\}$$

・ 価格決定は需給が合うところまで、値段を上げ下げする。

(c) 結 果

上記のモデルを走らせてできた市場価格の時系列データは先ほどの3つの特徴を見せた。

1. Unit-root: 図4.2-1の示すように、シミュレーション結果の値段の動きも、時系列の定常性が見つけにくい。

2. Fat-tail: シミュレーションでの変動の分布は中心が尖って、裾が厚かった。図 4.2-2 の示すように、ほとんどの変動は小さいものであるが、時々変動があると大きなものになっている。
3. volatility clusters: 図 4.2-3 の示すように、シミュレーションした値段の変動値でも、そのままでは自己相関はなかったが、自乗したり絶対値をとると、自己相関が見られた。

[メカニズム]

- ・ 市場価格 p がファンダメンタルズ価格 p_f に近いところでは、意見の変化は全体的な淘汰圧がなく偶然に支配される。
- ・ チャーティストが偶然ある一定以上の割合になると、チャーティスト同士が出会う確率が高く彼らが爆発的に増える。→ 値動き激しくなる。
- ・ しばらくすると、やはりファンダメンタルズ価格の方が長期的な利得の高さから、ファンダメンタリストが増える。→ ファンダメンタルズ価格に戻る。

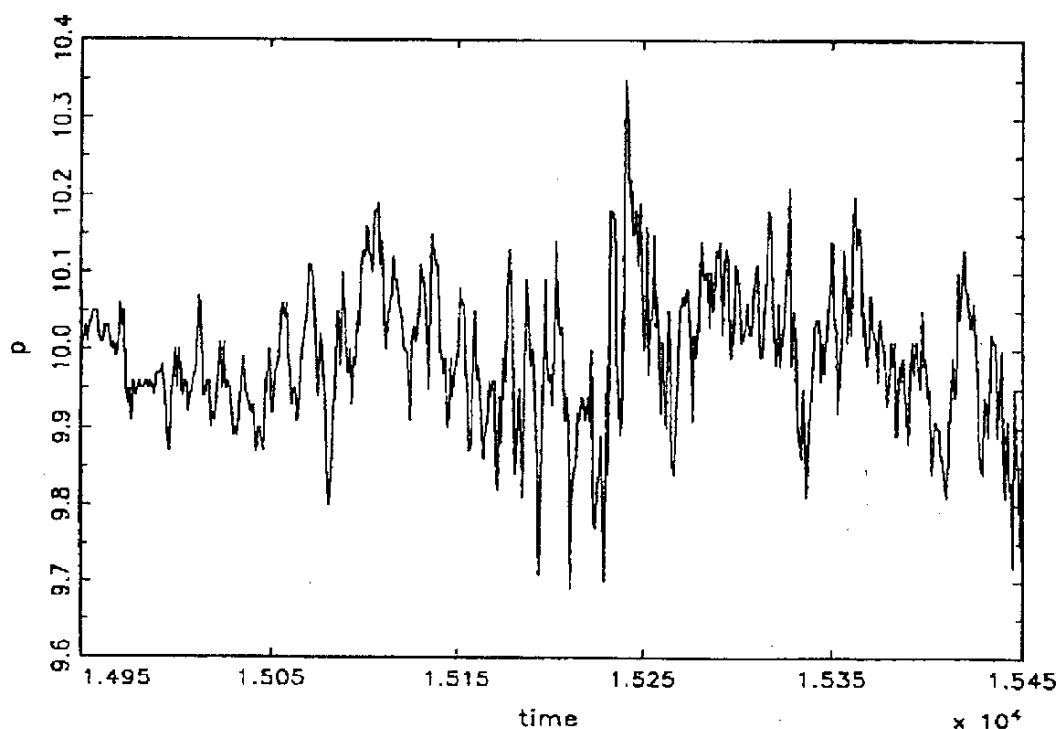
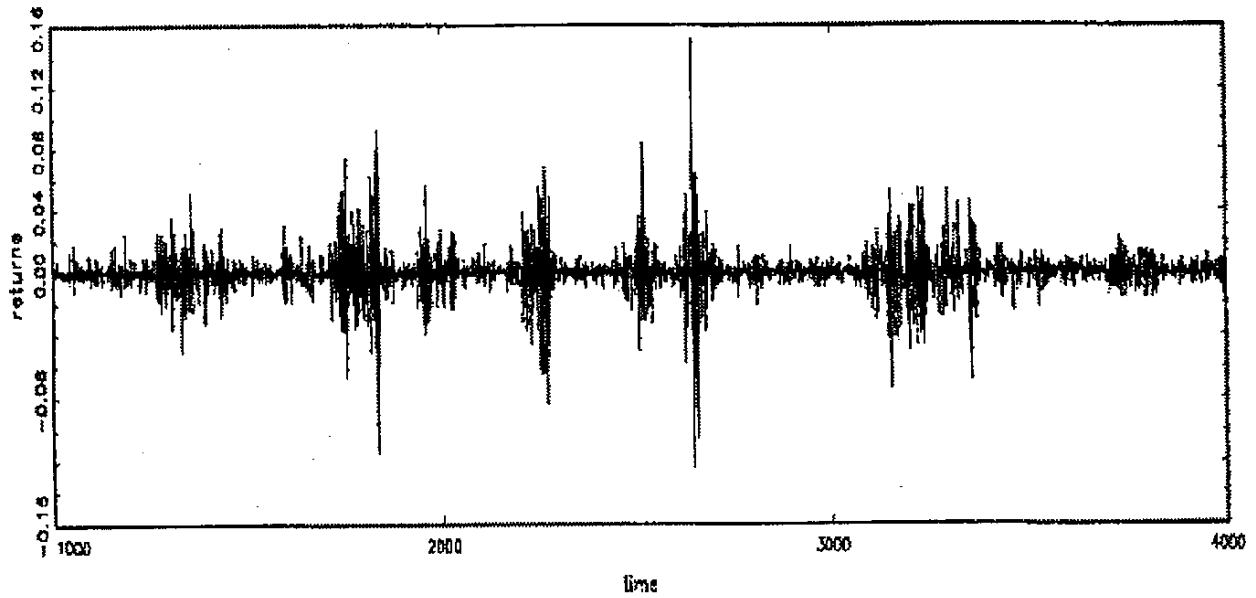


図 4.2-1 シミュレーション結果 1

シミュレーション結果の値段の動き。時系列の定常性が見つけにくい。

Simulated time series of returns



Fraction of chartists among traders

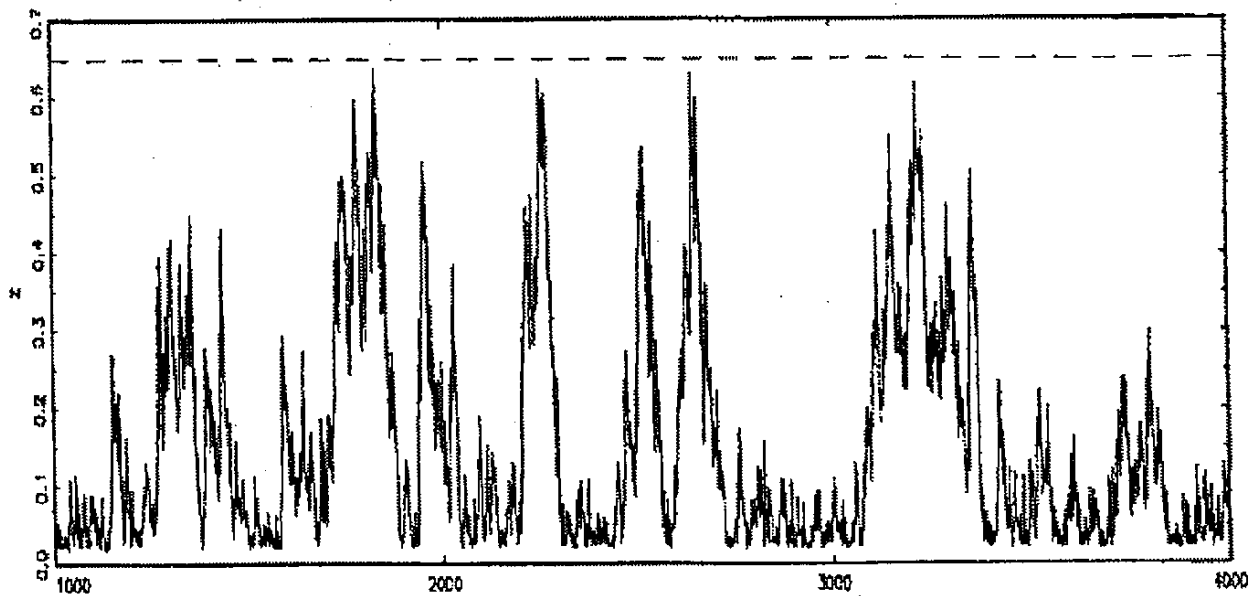


図4.2-2 シミュレーション結果2
上：値段の変動値 下：チャーティストの割合

Autocorrelations of raw, squared and absolute returns

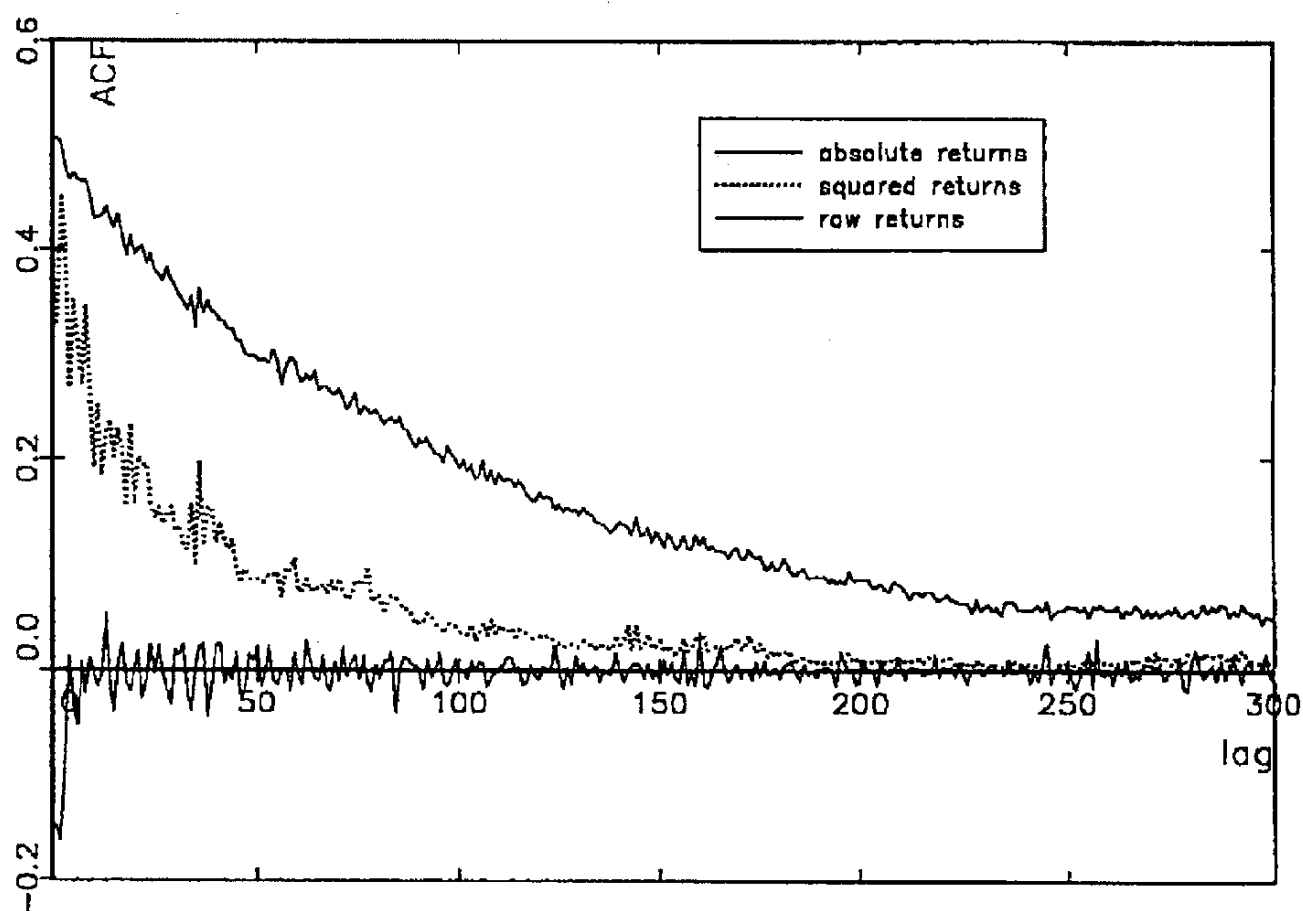


図4.2-3 シミュレーション結果3
値段の変動値のそのまま、自乗値、絶対値の自己相関。

4.3 欧州調査 I : 平成 9 年度実施

野田 五十樹 (電子技術総合研究所)

4.3.1 Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Address: V.le Marx 15, Rome, 00137, Italy

WWW: <http://www.cnr.it/>, <http://kant.irmkant.rm.cnr.it.gral.html>

行き方: ローマ、Termini 駅から metro B line (北方面) に乗り、Ponte Mammolo 駅で降り、311 に乗り、Viale Marx で下車。道を渡ったところにある、青い鉄骨とコンクリートの建物がそれ。Viale Marx は非常にわかりにくいので、バスの運転手にいっておいた方が無難。Termini から約30分。

(1) 概 要

Institute of Psychology の Neural Systems and Artificial Life 学科の Artificial Life 研究グループの Stefano Nolfi 教授を訪問し、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を用いたロボットの制御法の創発的獲得の研究の調査を行なった。

このグループの仕事の特徴は、ロボットの制御に用いている神経回路網を単に GA で進化させるのではなく、別の目的を持った学習を行なわせたり、あるいは回路網を学習回路網と教師回路用に分けてともに進化させるという方法を取っていることである。これらの方法をとることにより、GA による進化が加速されたり、集団全体の平均のパフォーマンスを上げたりできることを示している。

(2) 学習と GA の併用 (1)

GA による適応の試みとして、GA で神経回路網の各結合の重みの初期値を適応させ、さらに誤差逆伝搬 (Back-Propagation: BP) 学習によりその重みを変化させるという実験を紹介された。

GA と BP 学習はともに、与えられた評価関数を最大にするパラメータの値をある範囲の中で探索する手法である。つまり、同種の手法を同時に組み合わせて用いようという実験であり、彼ら以外にも多くの研究者が試んでいる。通常、この手の研究では、同一の評価関数を用いて GA と BP を行なうのが一般的であるが、彼らは、GA と BP 各々、異なる評価関数を用いていることが目新しい。彼らは、この手法により回路網がより安定して動作できる準最適解に到達することを示している。

実験の概要は以下の通りである。

部屋の床にゴミが散らばっており、そのゴミを回収するロボットが 1 台いる。このロボットは近距離のゴミや壁を認識できるソナーセンサーを 4 つ持っており、2 つの車輪により前後に進んだり左右に回転できるものとする。ロボットの制御は神経回路網により行なわれる。この神経回路網は 4 つのソナーセンサーの値を入力とし、2 つの車輪を動かすモータへの信号を出力とする。さらに、回路網は別の 4 つの出力ユニッ

トを持っており、このユニットを使って、次の時刻に起こるセンサーの入力を予測するようになっている。

回路網の学習は、次のセンサー入力の予測を行なう部分のみを使って行なわれる。つまり、この出力ユニットの活性値と次の時刻のセンサー入力の値を最小化するように、BP学習が行なわれる。一方、GAは回路網の結合の重みの初期値を遺伝子とし、集めたゴミの量を適合度として進化を行なわせる。

ここで興味深いのは、BP学習は外界の変化の予測を行なうことを目的としており、GAはゴミを集めるというタスク達成を目的としていることである。通常では、このように異なる目的を達成しようとする、お互いに邪魔をするだけのように思える。しかし実際には、回路網はかなりうまく両方のタスクを達成できるようになる。さらに、このようにして獲得された振舞いは、外界の変化に対し非常に頑健であることを彼らは示している。つまり、BPとGAが異なる目的を持って回路網を変化させようとするので、最終的には、回路網はこの2つの目的がお互いに影響し合わないところにおける準最適解に到達する。この準最適解は異なる目的が互いに影響し合わないため、環境の変化に対し比較的なだらかな適合曲面を描くところにあたっている。このため、BPやGAで獲得した目的以外のものに対しても、比較的影響を受けなくなっている。これが、獲得された振舞いが頑健である理由である。

関連文献

"Learning and Evolution in Neural Networks", Nolfi S., Elman J.L., Parisi D. Adaptive Behavior, Vol. 3, 1, pp.5-28 (1994)

(3) 学習とGAの併用(2)

GAと学習の組み合わせのもう1つ別の試みとして、ロボットのモータの制御用神経回路網と、その回路網の学習に用いられる教示信号を出力する教師回路網を同時に進化させる実験を紹介された(図4.3-1)。

この実験の設定は以下の通りである。

前の実験と同じく、部屋の中のゴミ拾いを行なうロボットを考える。このロボットは、ゴミや壁を検出する6つのソナーセンサーを持ち、2つの車輪モータによって進行方向を決定する。このモータの制御に図4.3-1に示すような回路網を用いる。この回路網の左半分は制御回路網であり、ソナーセンサーのデータをそのまま入力とし、2つのモータに与える値を出力する。一方、右半分は教師回路網であり、制御回路網と同じくセンサーデータを入力とし、2つの値を出力する。この2つの値は教師信号として制御回路網に渡され、この教師信号と制御回路網の出力が最小化されるようにBP学習を行なう。つまり、制御回路網の方は、1個体が生存する間に学習によって変化する。一方、教師回路網の方は、1個体の生涯の間、変化しない。よって、1個体の生涯が十分長い場合、制御回路網の出力はほとんど教師回路網の出力と同じになる。

はずである。

1 個体の制御回路網及び教師回路網の結合の重みの初期値は、その遺伝子によって決定される。つまり、教師回路網は完全に遺伝子によって決定され、生涯変化しない。一方、制御回路網は学習が始まる開始時点の回路網が遺伝子によって決定される。そして、この遺伝子は GA によって進化する。進化の際の各個体の評価関数は、その個体が生涯の間、どれだけのゴミを拾ったかにより決められる。

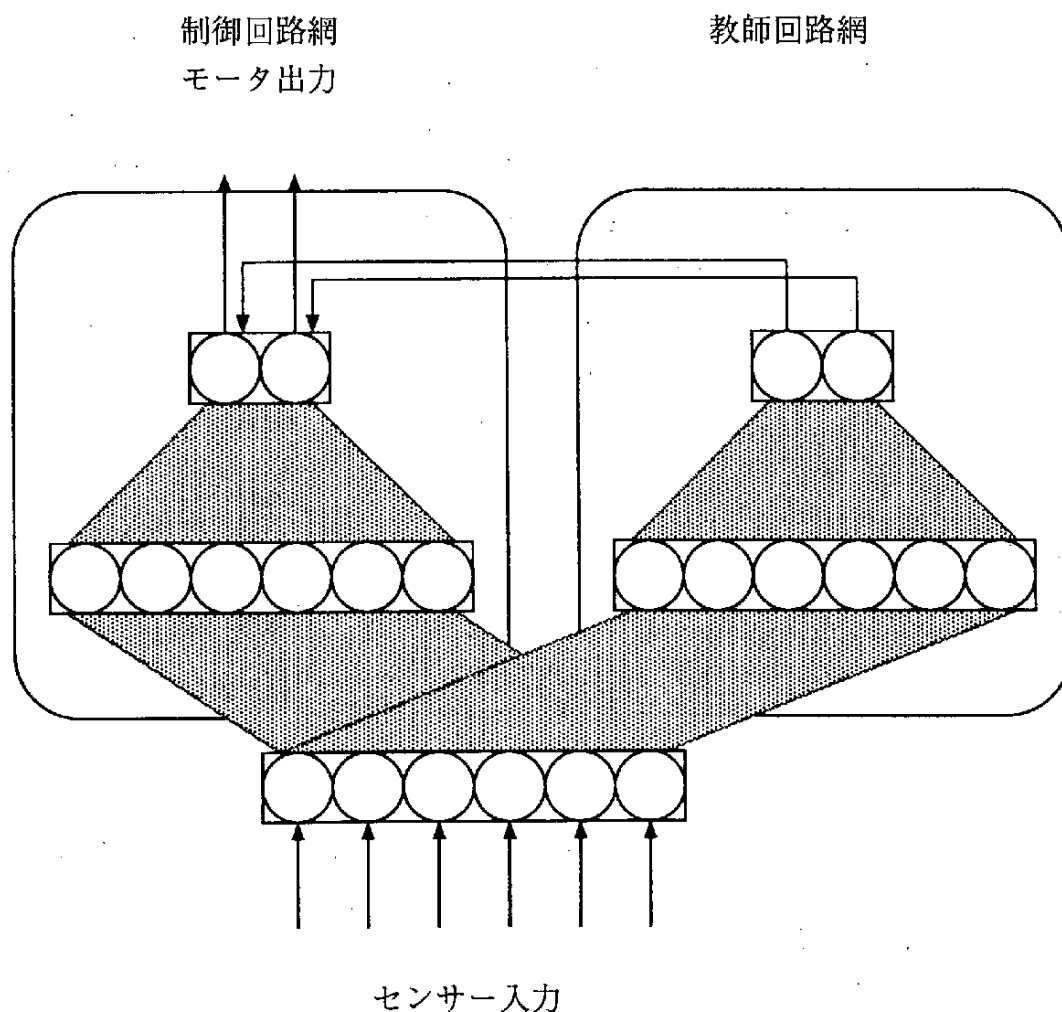


図 4.3-1 制御回路網と教師回路網

左の回路網（制御回路網）の出力は直接、車輪モータへの制御信号となる。右の回路網の出力は、制御回路網への教示信号となる。制御回路網はこの教示信号に従って、活動中に結合の重みを変更する。教師回路網の結合の重みは、活動中には変化しない。両回路網の結合の重みの初期値は GA による遺伝子によって定められる。

この設定を用いてGAの進化を行なうと、通常のGAによる進化¹に比べ、以下の点で優れていることが、実験によって示されている。

- 単純なGAに比べ教師回路網を組み込んだ方が、早い世代で最適適合に達する。
- 最終的な世代において、その世代の最優秀個体の適合値は単純な場合と、学習を組み合わせる場合ではそれほど差はないが、平均値では学習を組み合わせる方がよい。つまり、世代の中では、最優秀個体と同等の成績を収める個体の数が非常に多い。

この設定において素朴な疑問は、なぜ教師回路網の出力を直接モータ制御に使わないかということである。上に述べたように、学習によって制御回路網の出力は教師回路網の出力に近づく。ならば、学習の際の目標値である教師信号を直接使った方が、始めから使った方が、適合値が上がるのではないかというわけである。この疑問に対する答えは、以下の通りである。

教師回路網の出力を直接使う、すなわち単純なGAのみによりタスクの最適解を探索するということは、その最適解となるパラメータの値を直接求めることになる。それに対し、学習する制御回路網と教師回路網という組み合わせは、制御回路網の初期値と教師回路網の初期値が、タスクの最適解をはさむように位置すれば、全体的な適合値をあげることができる。つまり、単純に最適値を求めるという問題を、最適値をはさむ2点を求めるという問題に変更することで、問題の探索の困難さを和らげているというわけである。ここで重要なのは、制御回路網の学習に要する時間²が1個体の生存期間に比べ多少長いということを仮定している。よって、学習があまりに速く、制御回路網がすぐに教師回路網と同じ出力をするようになってしまうと、通常のGAと変わらないことになる。

関連文献

"Learning to adapt to changing environments in evolving neural networks", Stefano Nolfi and Domenico Parisi, Technical Report 95--15, Department of Neural Systems and Artificial Life, Institute of Psychology, C.N.R.-Rome

(4) GAによるモジュラリティ

複雑な振舞いをロボットに行なわせるためには、その制御機構のモジュラリティが重要になる。このモジュラリティをどのように設定するかは難しい問題であるが、これをGAにより創発させる可能性を探る研究を行っていた。

1 単純に、制御回路網を進化させ、1個体の生涯の間、学習による変更は行なわない。

2 制御回路網の出力が教師回路網の出力とほぼ同じになるまでの時間。

もしロボットの制御機構として、一様な神経回路網³を用いる場合、そのタスクに依存せずに学習を行なわせられるが、複雑な振舞いを獲得するまでには一般に非常に多くの時間がかかるという欠点もある。一方、その振舞いを人間があらかじめモジュールに分割できる場合、その分割が適切であれば、短い時間で複雑な振舞いを実現する回路網を構築できるが、モジュール分割が適切でない場合、うまくタスクが達成できない可能性がある。

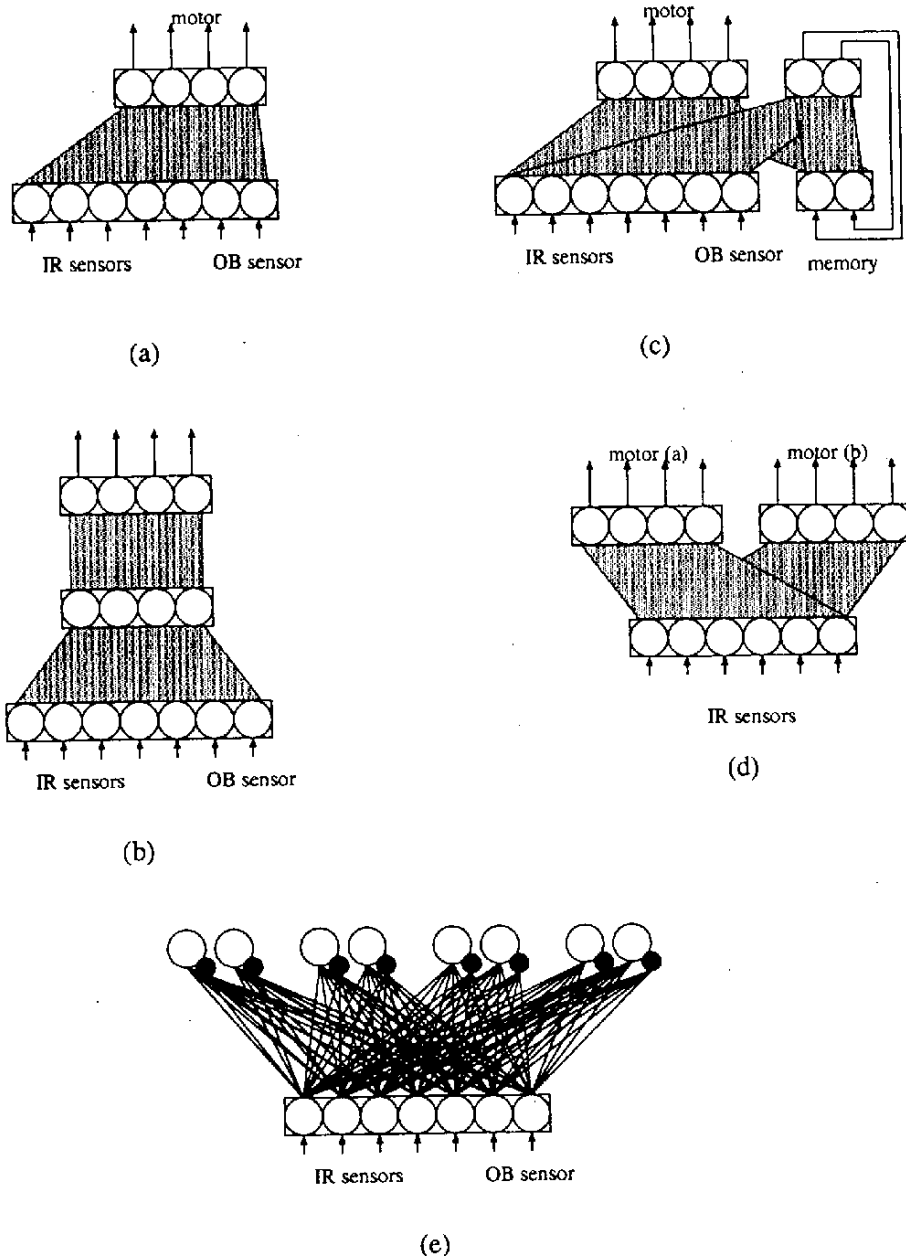


図 4.3-2 各種モジュラー回路網

この研究では、このモジュールへの分割を人間が行なうべきか、あるいは GA により創発させるべきかを実験によって比較している。

3 入力層から出力層まで全結合でつながれている回路網。内部に明示的なモジュラリティはない。

彼らはゴミ拾いロボットの制御構造を神経回路網で実現し、人間が前もってモジュラリティを規定するより、GAにより創発させる方が進化が速くなることを示している。

彼らの実験の設定は以下の通りである。

ロボットを制御する回路網として、図4.3-2に示すようないくつかの種類の回路網を用意する。この各々のを用いてゴミ拾いタスクを行なわせ、GAによりこの回路網の結合の重みを変化させる。この場合のゴミ拾いタスクでは、ロボットの腕を使って、「ゴミを持ち上げる」「ゴミを離す」という動作もコントロールする必要がある。

ここで特に注目すべきなのが、(d)と(e)の回路網である。(d)では、ゴミを持っていない時用の回路網(左側)とゴミを持っている時用の回路網(右側)がすでに用意されており、ゴミのあるなしにより、別々のモジュールでロボットを制御しようというものである。一方、(e)ではそのような明確なモジュール性はなく、そのかわりに各出力ユニットを2つずつ用意し、gateユニットによりそのどちらの出力を選ぶかを選択する。このgateユニットの結合もGAによって変化する。よって、(e)の回路網は、モジュラティを創発する枠組は用意されているが、どのような分け方でそのモジュールを使うかは指定されておらず、回路網が自分で獲得する必要がある。

実験では、適合度の改善の速さ、最終適合度の高さともに、(e)の回路網がもっとも良い成績をおさめた。このことは以下のことを示している。

- モジュラリティのない回路網(a-c)は、進化が遅く、十分な適合度を獲得できない。
- あらかじめモジュールの役割を決めておく場合(d)、モジュラリティがない場合に比べると進化は速いが、モジュールの役割を決めない方(e)がより進化が速く、達成できる適合度も高い。

さらに回路網の動作を解析すると、(e)の回路網では各出力ユニット対はほとんどの場合において片方のユニットの出力を使っており、ただ1つの対のみが、たまにもう一つのユニット出力を使っていることがわかった。この出力の選択は、(d)で人間が行なった、「ゴミを持っている／いない」の区別とは異なっており、その意味付けは簡単には行なえないことがわかった。

つまり、下手に人間の知識を入れるよりも、自動的に進化する枠組を用いて環境からモジュラティを獲得する方が、効率がいい場合が多いことを示唆している。

関連文献

"Using Emergent Modularity to Develop Control Systems for Mobile Robots", Stefano Nolfi, Technical Report 96--14, Department of Neural Systems and Artificial Life, Institute of Psychology, C.N.R.- Rome

(5) 共進化

捕食者と被食者のロボットを用意し、共に進化させた場合、どのような進化をたど

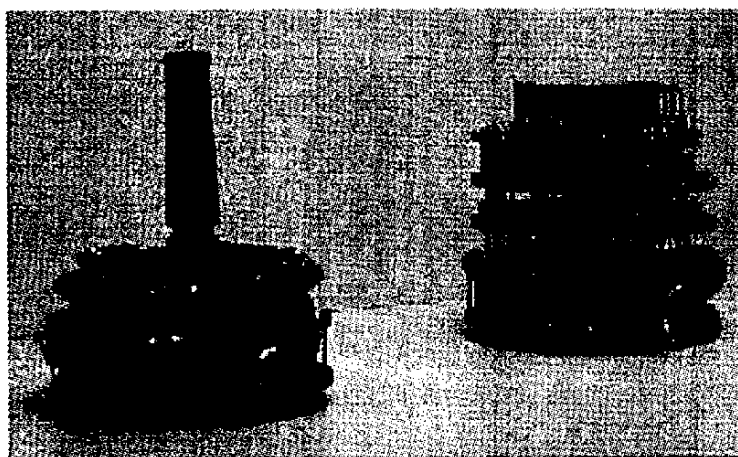


図 4.3-3 捕食者ロボットと被食者ロボット

るかという実験を紹介された。この実験の設定では、相手の出方によりあきらかに異なる戦略があるため、最適解は存在しない。よって、無限に進化し続けることになるが、設定をうまくしないと、適切な進化が起きないことを示している。

実験は以下のように行なわれた。まず、図 4.3-3 に示すような 2 種類のロボットを考える。これらのロボットには、一方（被食者）が逃げ回り、それを他方（捕食者）をおっかけ続けるというタスクが課せられている。例えば、実験の初期設定としては、図 4.3-4 のような形で行なわれる。

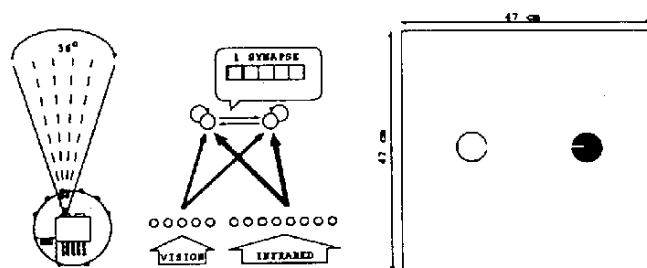


図 4.3-4 実験の設定

両ロボットの振舞いを制御する回路網をGAによって進化させると、各世代において、両ロボットの適合度は図4.3-5のように変化する。つまり、はじめ捕食者はなかなか相手を捕まえられなかったが、じょじょに捕まえられるようになり、適合度が上がってゆく。一方、被食者も進化するので、捕食者の適合度はある程度以上は上がらず、バランスをとりながら進化が続く。

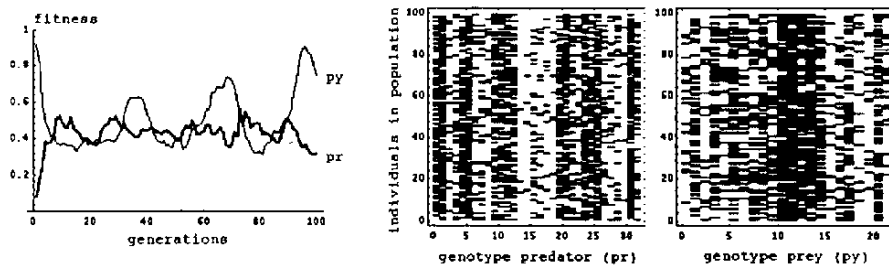


図4.3-5 進化による平均適応度の変化

進化の各世代では、ロボットはさまざまな行動を創発する。図4.3-6はその行動の例である。これらの行動は、世代毎に絶えず徐々に変化し、一定の解に落ち着くことはない。

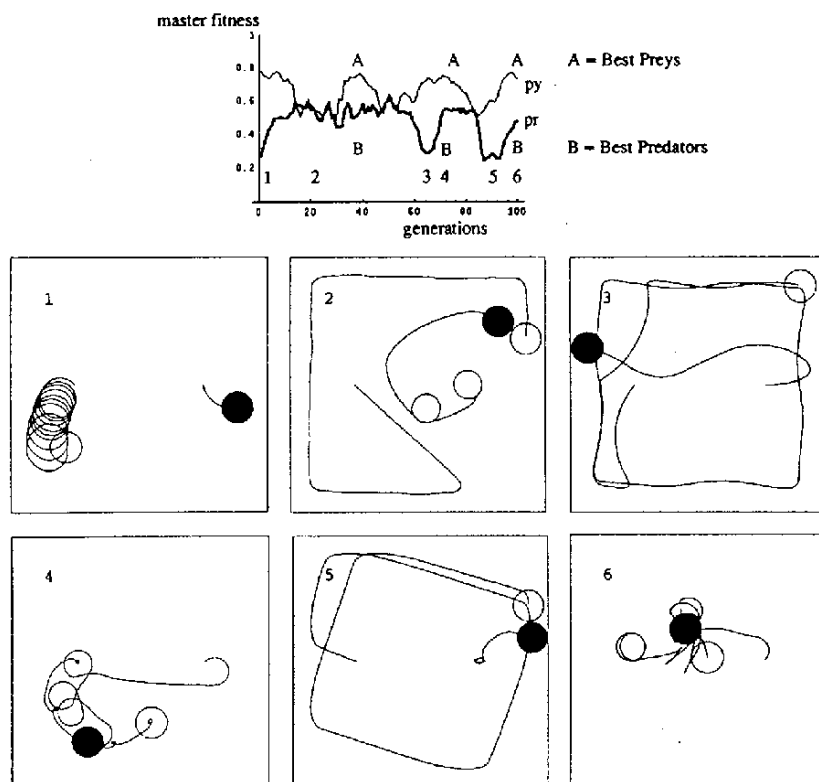


図4.3-6 進化による行動の変化

ここで興味深い点は、両ロボットを進化させる上で、相手のロボットは旧世代のものをを用いる点である。もし、同世代のロボットを用いて進化させると、発信現象が起きてしまい、なだらかな進化をたどらない。これは、GAのシミュレーションが世代毎に区切られて行なわれている問題と強く関わっていると思われる。自然界と同じく、世代に関係なく連続的に進化が起きる枠組が望まれる。

関連文献

"God Save the Red Queen! Competition in Co-evolutionary Robotics", Dario Floreano and Stefano Nolfi,

"Adaptive Behavior in Competing Co-Evolving Species", Dario Floreano and Stefano Nolfi,

4.3.2 École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Address: Ecublens, IN-F, CH-1015 Lausanne, Switzerland

WWW: <http://www.epfl.ch/>, <http://diwww.epfl.ch/lami/>

行き方: ローザンヌ中央駅 (CFF) からメトロで Lausanne Fl. へ。そこから、Metro Quest 線に乗り、約 15 分。EPFL 駅で下車。

(1) 概要

情報工学部の LAMI (Microprocessors Systems Lab) プロジェクトの研究を調査した。

このプロジェクトでは Khepera という小型ロボットおよびそのシミュレータを開発し、それを用いて実世界におけるロボット個体やロボット集団の制御方法を様々な方法によって開発している。特に senior researcher の Dr. Dario Floreano を中心とするグループは、GA を用いて、共進化、subsumption architecture の進化などの研究を行なっている。

(2) Khepera

Khepera 図 4.3-7 は直径 5cm の小さなロボットであり、その中に、CPU、カメラ、赤外線センサなどセンサと、駆動用の車輪とものを掴む腕を積んでおり、自律して動かすことができる。また、シミュレーション環境が整っており、ワークステーション上で制御プログラムを作成し、シミュレーションで動作を確認した後、本体にダウンロードして動かすことができる。

このロボットは、小型で安価であるため、容易にマルチロボットの実験ができるという点で優れており、彼らの研究室においても盛んにその研究が行なわれていた。

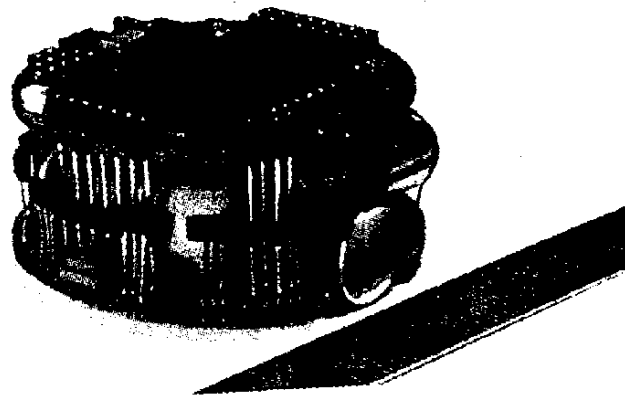


図 4.3-7 Khepera ロボット

① Khepera Simulator

Dr. Olivier Michel 氏は、Khepera の制御プログラムを容易に作成するためのシミュレータを作成していた。これは、ケペラの動きをシミュレートするだけでなく、センサー入力をかなり正確にシミュレートしている。また、X window 上のインターフェースを利用して、外界を人為的に変化させることもできる。

Michel 氏は今後、このシミュレータを汎用に利用できるよう、拡張していく予定であると述べている。実世界におけるマルチエージェントシステムの研究を行なうツールとして、非常に重要な研究と思える。

詳しくは、以下のサイトを参照されたい。

<http://diwww.epfl.ch/lami/team/michel/webots/>

(3) GA による Subsumption Architecture の構築

複雑な環境で安定に動作するロボットの制御機構として、subsumption architecture が注目されているが、その機構の内部にあるいくつかのbehavior moduleをどのように結び付けるか一般に難しいという点が、この手法の問題点となっている。彼らはこれを解決するため、GAによりmodule間の結合を創発的に獲得するという実験を行なっていた。それにより、GAでもかなりうまくmodule間の結合を獲得できることは示されていた。

実験は以下のように行なわれた。まず、Khepera ロボットの制御構造として、図 4.3-8 のような構造を考える。この制御構造を、いくつかのモジュールに分け、これらのモジュールを相互に結合することを考える。このモジュール間の結合を GA によって進化させる。ロボットが行なうタスクはゴミ拾い (図 4.3-9) である。つまり、

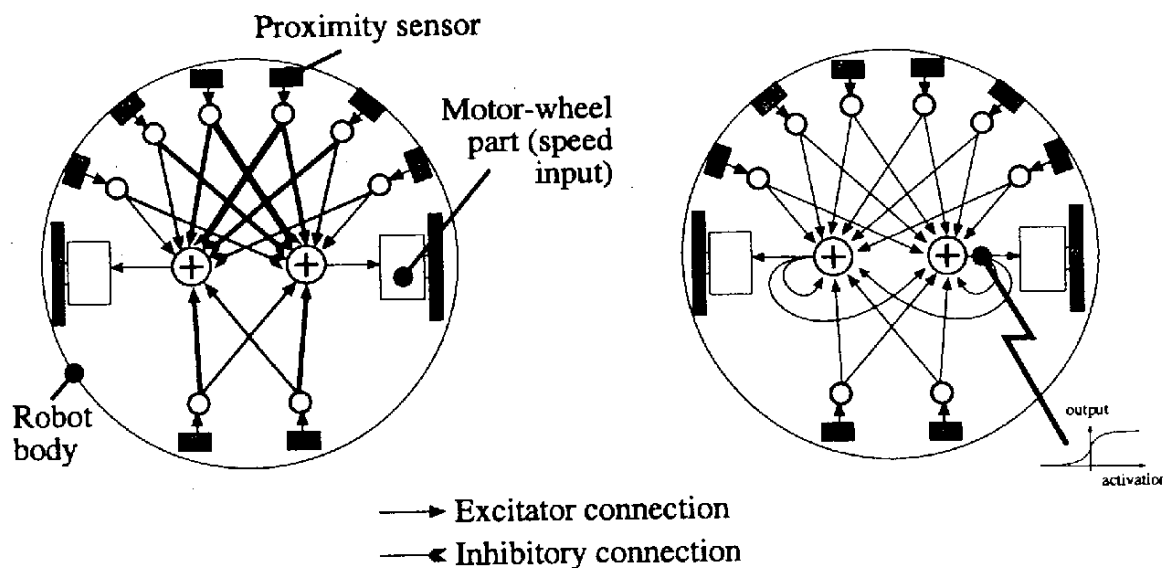


図4.3-8 ロボットを制御する回路網

ロボットはできるだけ早く敷地内のゴミを拾い集め、枠の外に捨てる。同時に、ロボットは自分の電池の残量を調べ、少なくなったら補給所において充電を行なわなければならない。

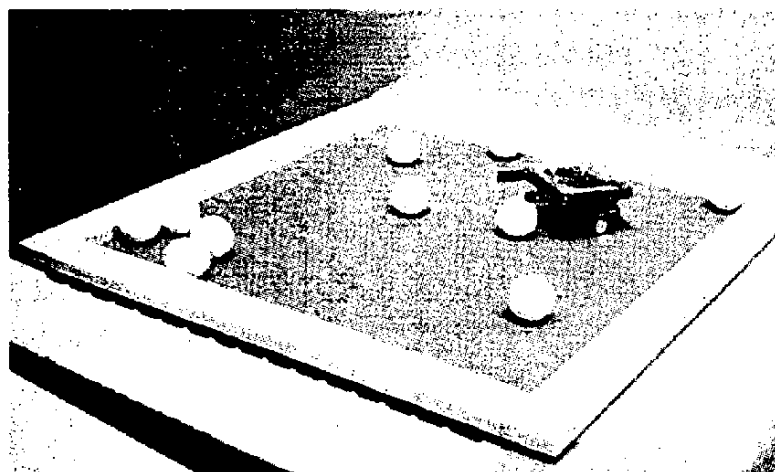


図4.3-9 ゴミ拾いタスク

ならない。このような設定でうまく仕事をこなす制御構造を創発することが実験の目的である。かれらの実験では、GAによりうまくその制御構造が獲得できることを示している。

ただ、彼らの実験では、module間の結合は創発されているが、module自身は事前に用意されていた。実際には module 自身の設計も含めて GA を行なう必要があり、彼らも今後の課題として取り組んでいく予定らしい。

(4) 地図学習

マルチロボットのタスクとして取り上げられることが多いのが、未知の環境の地図を作るということである。この地図の作成において問題となるのが、作成された地図をどのような表現で保持するかである。つまり、一般の地図のようにイメージで表現した場合、その環境の多くの属性を表現できる一方、高度な推論には用いにくい。逆にシンボリックに表現した場合、推論には便利であるが、多くの情報が失われるため柔軟性がない。

彼らはこの問題を解決するため、行列による表現とグラフによる表現を合わせて持つという手法を提案している。そして、実際に Khepera を用いて地図の獲得を行なうシステムを構築していた。さらに、彼らは地図の獲得のための探索を効率良く行なうため、ある地域の地図についてどれくらい確信を持っているかを表す値を保持しておき、それによって、曖昧なところを優先的に回るという手法を使っていた。現状では彼らのシステムはまだ簡単な地図しか学習できないが、枠組としてはいろいろ拡張できる部分が多いように見え、今後の発展に期待したい。

4.3.3 Helsinki University of Technology (HUT)

Address: Rakentajanaukio 2C, TTK-F FIN-02150 Espoo, Finland

WWW: <http://www.hut.fi/English/>

行き方: ヘルシンキ駅の西方向のバスステーションから102番のバスに乗り、終点の1つ手前で降りる。終点までいっても歩いて15分。バスに乗っている時間は約15分。

(1) 概要

Control Engineering Lab. の Heikki Koivo 教授のグループ、Neural Networks Research Centre の Erkki Oja 教授のグループ、及び、Automation Lab. の Arto Visalo 教授のグループの研究を調査した。

Heikki Koivo 教授のグループでは、自己組織化マップを用いて、多数のモデルを切替えながら対象システムを近似するシステムを、GA を用いて構築する方法を研究している。これにより、1モデルでは記述し切れない複雑なシステムの振舞いを表現できることを示している。Erkki Oja のグループは、non-linear Hebbian 学習、non-linear PCA、ICP など、従来の主成分解析 (PCA) の拡張に当たる研究を精力的に進めており、これら新しい手法により、異なる情報源からの信号が混ざったデータから、元のデータを復元することがより精度良くできることを示している。

(2) EVSOMを利用した複数モデルによるシステム同定

Heikki Hyötyniemi 博士とその同僚は、同大学の Kohonen 教授の提案した SOM (自己

組織化マップ、Self Organization Map) を利用して、複雑なシステムを同定するシステムを構築していた。

一般に未知のシステムを同定する場合、ある1つのモデルを仮定し、対象とするシステムの挙動に合うようにモデルのパラメータを調節してシステムの同定を行なう。しかし、この手法では複雑で多様なシステムを同定するのは難しい。彼らの提案している方法は、さまざまなモデルを多数用意し、それをSOMの各ユニットに割り当てる。そして、システムの挙動と各ユニット(モデル)の挙動を比較し、一番近いユニット

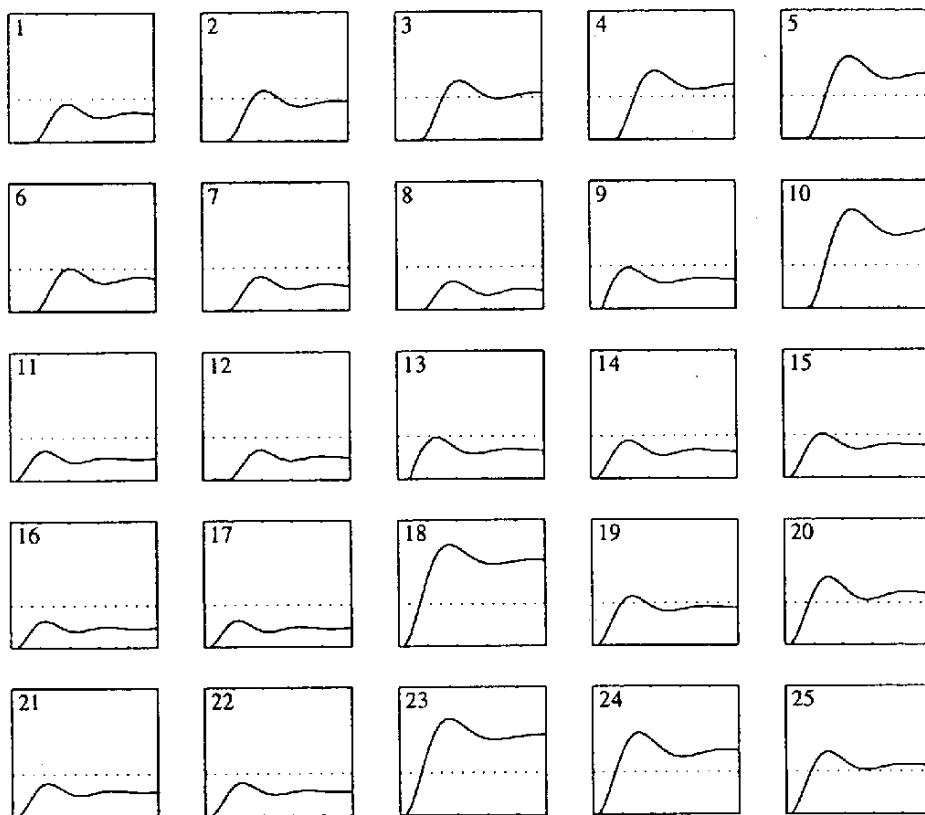


図4.3-10 EVSOMの各ユニットの予測波形の例

を winner ユニットとして自己組織化を行なう。ただし、この自己組織化は通常の学習ではなく、遺伝子アルゴリズムの手法を用いる。このようにすると、SOMの性質により良く似たモデル同士は近くに配置され、これによりマップ上の近さでシステムの同定をしやすくなる。また、システムが非常に複雑な場合、そのマップ上を移動させることでより広い範囲のシステムの記述ができるようになる。

彼らはこの手法を、化学プラントのデータに適用し、これまでの手法に比べより正確なシステムの予測が行なえることを示している。

この手法は、従来に比べ説明できるシステムの範囲が広がっている点は面白いと思われる。ただ、このように一般化した手法ではパラメータの数が増え、汎用性の面

で問題が出る。この点が解決されれば、実用的な手法になると思われる。

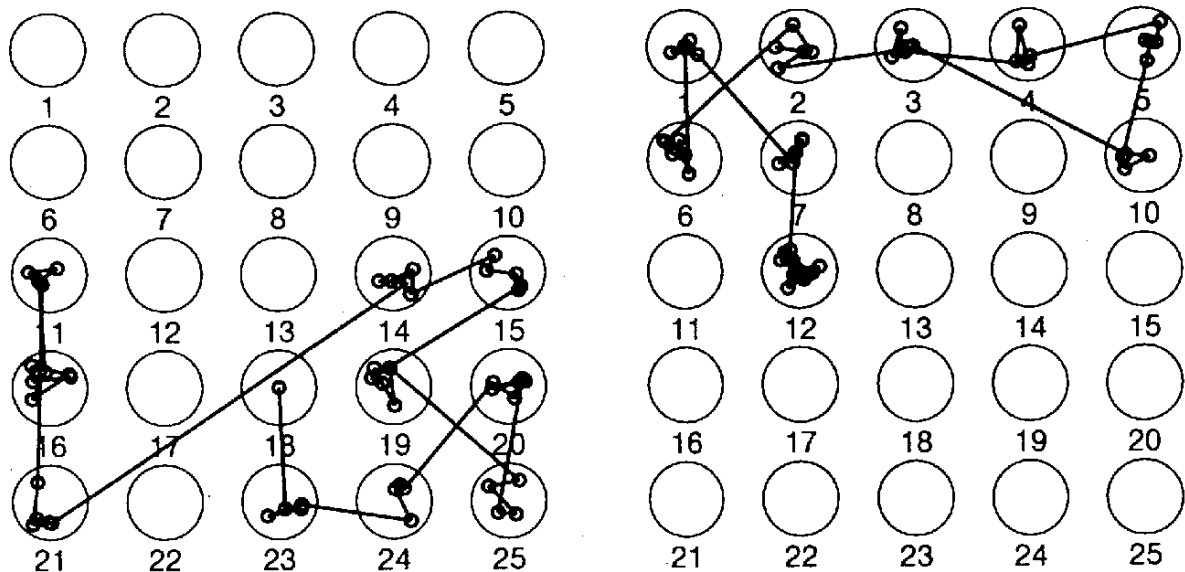


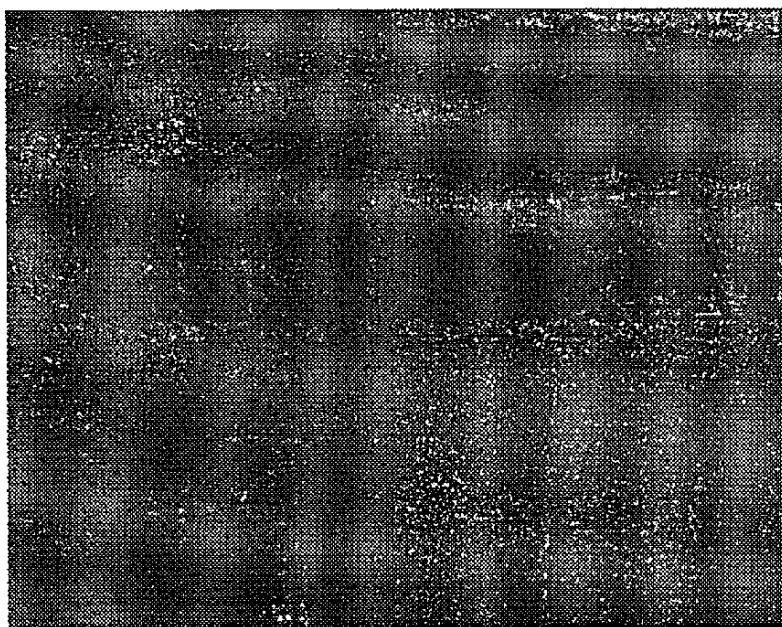
図 4.3-1 1 システムの同定時におけるEVSOMのユニット上の遷移の様子

(3) non-linear PCA

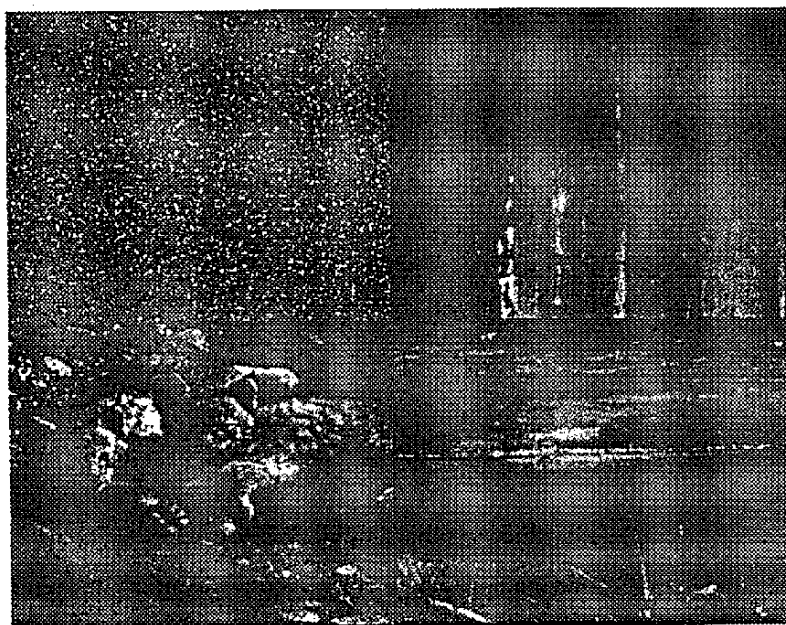
Erkki Oja教授は長年、PCAを一般化した解析方法を、数学的に解く手法を構成してきている。PCAは多数の計測データから特徴を抽出する強力な手法として広く用いられているが、そのバックグラウンドとして、あらゆるデータは正規分布に基づいて得られるという前提がある。しかし実際の複雑な現象では正規分布を仮定できないものが多くあり、PCAに代わる統計的手法が望まれていた。Erkki OjaはPCAを、2次のキュムラントを最大化するための1次変換であることを示し、それから逆に任意のキュムラントを最大化する手法を提案した。そして、その理論を元に、独立に提案されてきた non-linear hebbian rule, ICP などが同じ枠組で議論できることを示している。

(4) ICAを利用した画像の分離

Erkki Oja 教授の共同研究者である Juha Karhunen 博士は、彼が提唱してきた ICA (独立成分解析, Independent Component Analysis) を用いて、複数情報が混ざっているデータから、元の情報を復元するという手法を提案している。実験では、彼は、複数の絵を混ぜ合わせた画像から、元の絵を復元するという実験を行っていた (図 4.3-1 2)。このタスクは従来の PCA などと解析すると、どうしてもいくつかの元の絵が混ざったものまでしか復元できなかった。それに対し、彼の方法では非常に鮮明な絵に復元することができている。



(1) 分離前



(2) 分離後

図4.3-1 2 ICAによる混合画像からの現画像の復元

彼と彼の同僚は、同じ手法を脳の診断に用いる実験を行っていた（図4.3-13、図4.3-14）。つまり、脳波など頭の外部から計測できるデータを用いて脳の状態を分析し、異常なところがどこにあるかを推定するというものである。つまり、このICAという手法は汎用性が高く、実世界の複雑な事象を扱うことができることがわかる。

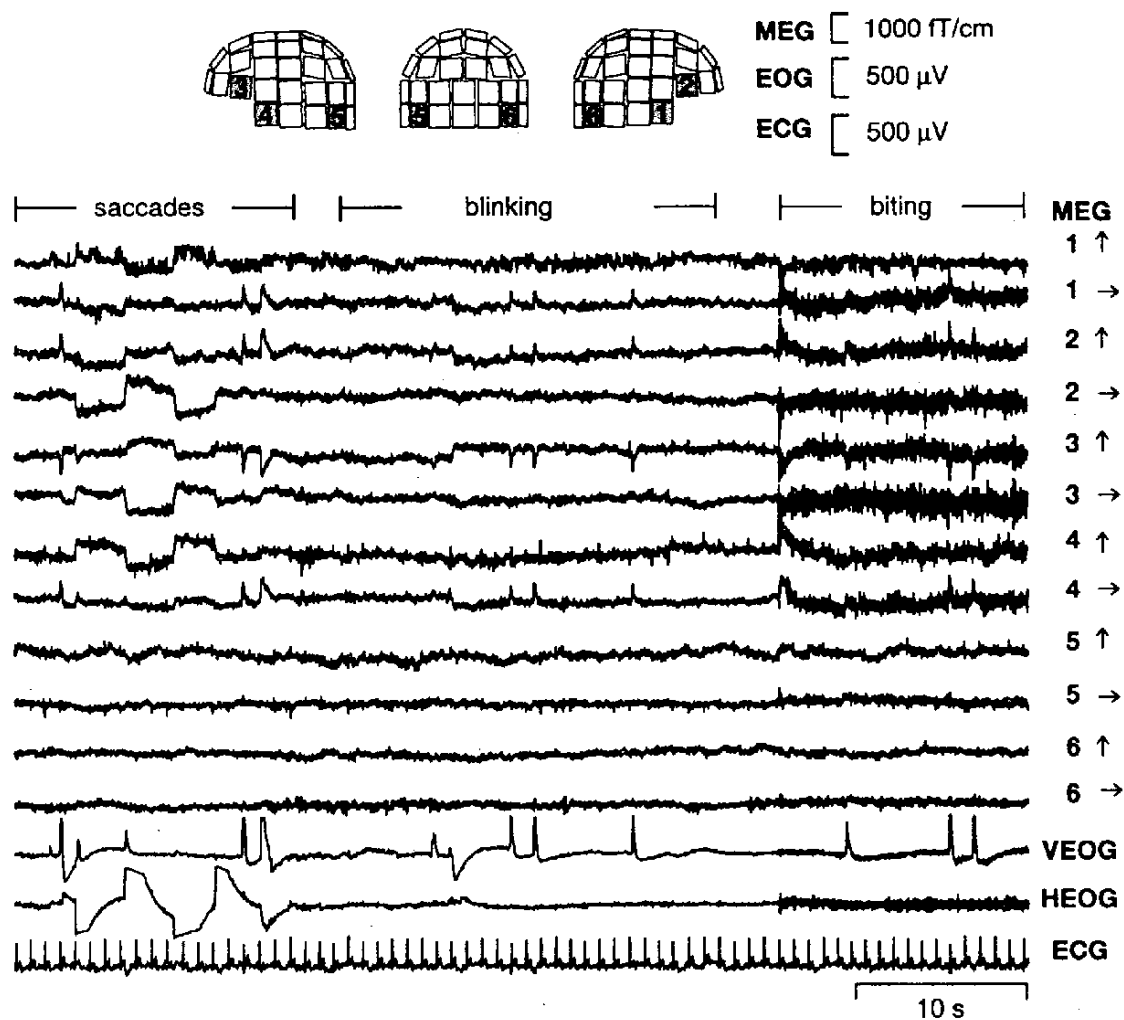


図4.3-13 MEGから得られる波形

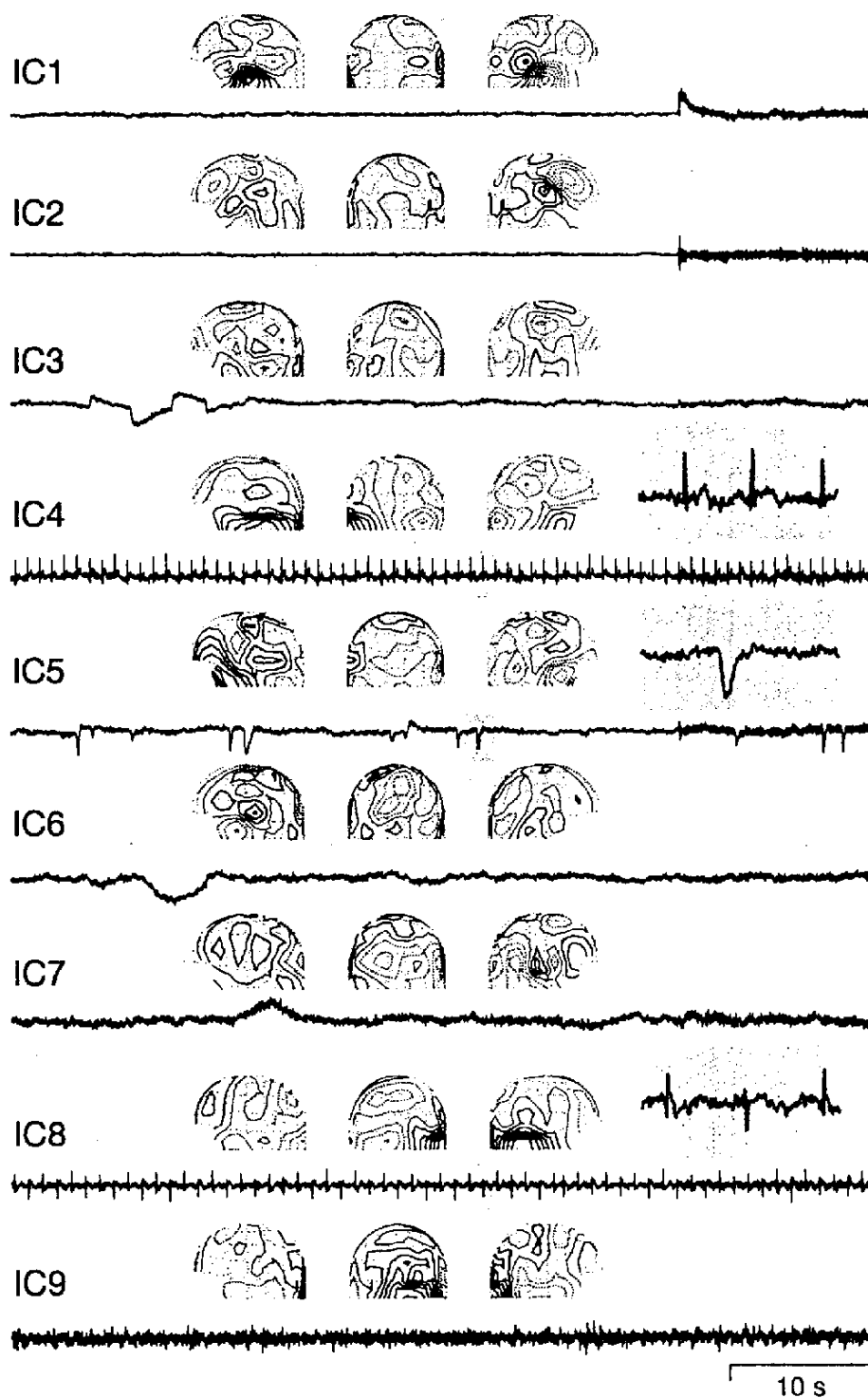


図 4.3-1 4 MEG波形を ICA で解析した結果

4.3.4 まとめ

ヨーロッパではアメリカと違い、1つの研究課題を比較的長期に渡って行なっているという研究所、研究者が多いように見受けられる。そしてその中から、重要な研究の種になるものが出てきているように思える。今回の訪問先でも、ヘルシンキ工科大学は昔から神経回路を中心とした研究を息長く続けており、Kohonen の SOM や Oja の non-linear PCA などの研究が今、世界的に注目されているようになっている。

4.4 欧州調査II：平成10年度実施

木下 佳樹 委員（電子技術総合研究所）

4.4.1 はじめに

1998年5月9日から21日にかけて、英国およびデンマークにおける計算機科学とくにプログラム意味論の研究を視察したので報告する。

具体的には

- ・ 14th Mathematical Foundations of Programming Semantics (workshop) への参加
- ・ オーフス大学 BRICS (Basic Research In Computer Science) への訪問
- ・ エディンバラ大学 LFCS (Laboratory for Foundations of Computer Science) への訪問

の三つを行なった。さらに Arhus 大学において開催予定であったワークショップ

NBE'97 (Normalization By Evaluation)

にも参加の予定であったが、これは開催当時続いていたデンマークにおける交通ストライキのため、会議自体もスウェーデンに移動し、筆者は参加できなくなった。

以下では、まず第4.4.2項において、プログラム意味論と複雑系科学とがどのように関連しているのかについて述べる。今回の研究動向調査ではプログラム意味論の中核的な学会に参加し、またその研究拠点を訪問したのだが、この分野がどのように複雑系科学と関連するのかを説明しておくことが必要であろう。次に第4.4.3項では、MFPSの参加報告をする。続いて第4.4.4項でBRICSの、第4.4.5項でLFCSの、それぞれ訪問報告をする。最後に、この研究動向調査中に行った議論をもとに執筆した研究論文「クヌース・ベンディクスの代りに米田---モノイドの場合」（コンピュータ・ソフトウェア誌に掲載予定）を付ける。

4.4.2 プログラム意味論と複雑系

プログラム意味論は、数理科学的立場からプログラム、あるいは広義にはソフトウェア一般をモデル化し、その性質を解析していこうとする学問である。いろいろな状況の下で、いわゆる「プログラムの正当性」を示すのがプログラム意味論の目的だといってよい。

さて、ソフトウェアを書くにあたっては、いろいろなデータ型を作成する。現代の

プログラミング言語では、データ型どうしを組み合わせる新しいデータ型を定義して用いる機能が用意されるのが普通で、そのため、プログラムの数と同じ数のデータ型が作られるといつてよい。

これらのデータ型をモデル化するために「代数構造」が用いられる。伝統的数学では、群、環、線型空間など、いろいろな現象に普遍的に現われる代数構造のいくつかについて、その性質を詳しく調べる理論を展開してきた。しかし、プログラミングにおいては、プログラム毎に一つの代数構造が現れるのだから、それらの代数構造一つ一つは他のプログラムにも普遍的に現われるというようなものではなく、したがって、それらについて詳細な研究を展開する価値があるとは限らない。しかしながら、それらの構造どうしのあいだの関連を調べる理論が必要である。これは「抽象データ型の実現」という形でもっとも特徴的に現われる。

たとえば、スタック型を配列型を用いて実現する、というようなことをするが、ここで、「正しく実現されている」という主張をするには、「スタック型の理論」と「配列型の理論」の両方に跨がる理論が必要である。さらに、「段階的詳細化」によるトップダウン・ソフトウェア開発を考察しようとする、スタック型の別の実現がリスト型を用いてなされており、「さきの配列型による実現とこの実現とが本質的に同等である」などという主張をしたい場合もでてくるが、ここでは、ますますいろいろな理論の間の関連を対象にしなければならない。

このような状況に対しては、「構造」というものを対象化して、構造に「ついて」の一般論を展開するアプローチが有効だと考えられている。ここに複雑系科学との関連が生まれる。

複雑系科学のうち、とくに物理学に関連する分野では、量子力学の出現により、唯一絶対のパラダイムがある、という信念はくつがえされざるを得なかったものの、カオス現象に注目するまでは、新しくパラダイムを作るといのは、日常的に起こることではなかった。ここでパラダイムを上記の「構造」と置きかえると、プログラム意味論のおかれている状況に極めて類似してくる。物理学では（誇張していえば）現象毎にパラダイムがでてくるが、プログラム意味論では、プログラム毎に構造が生まれる、というわけである。

複雑系科学の立場で重要な点の一つに、「理論を観測者と切り離して考えることをしない。したがって、できあがる理論は万人向けのものとはなり得ず、極めて主観的なものであり、何か一つの立場を設定して初めて理論ができる」ということがある。ここでの、「立場の設定」が、プログラム意味論での「構造の設定」に類推され、プログラム意味論で用いられる構造の一般論への興味が、一部の複雑系研究者の側から寄せられている。

プログラム意味論と複雑系科学の関連があるとすれば、多数の構造が生まれ、それらの構造の間の関連、変換などを調べることの必要が共通している、というところにあると思われるのである。

今回の調査研究は、以上のような事情を考えて、プログラム意味論でも、とくに構造の一般論である圏論を用いた研究を行っているサイトを訪問した。また、プログラ

ム意味論の中心的学会である MFPS でも圏論の使用は日常的なものとなっている。

4.4.3 14th Mathematical Foundations of Programming Semantics (MFPS)

London 大学 Queen Mary and Westfield College において開催された第14回 MFPS (Mathematical Foundations of Programming Semantics) に参加した。この会は、プログラム意味論の研究者が集まる最も高度な研究集会の一つで、予め審査に通った講演だけからなる conference と、審査を一切せずに申し込みのあった講演をすべて受け付けるワークショップの形のものを一年おきに交互に開いている。今年はワークショップの年であった。以下では、筆者にとって特に興味深かった講演を挙げる。なお、MFPS のホームページが

<http://www.math.tulane.edu/MFPS.html>

にある。

(1) M. Hyland: Sequentiality

Cockett および Schalk との共同研究。M. Hyland は Cambridge 大学純粋数学科の reader で論理学、圏論、理論計算機科学などを横断する仕事を続けている。

プログラム意味論における近年の注目すべき動きに「ゲーム意味論」がある。これは、古典的な集合と写像に基づく意味論に対して、何らかの相手との通信（ゲーム）を基本概念として計算のモデルを作ろうとするもので、S. Abramsky、M. Hyland らをはじめ、英国で盛んに研究されている。今回の Hyland の仕事も、ゲーム意味論のための数学的構造の一つと考えられる。

抽象的に、因果関係を持つものの圏 "causality space" を定義し、それが $\ast$ -autonomousであることを示し、さらにその部分圏として "sequential interaction" と "sequential map" からなる圏を定義し、それも $\ast$ -autonomousであることを示した。この道具立てのもとで、様々な計算モデルのつくる圏が、sequential interaction と sequential map の圏に埋め込めるかどうかを調べている。

$\ast$ -autonomous 圏は双対性を取り扱うのに適した概念で、M. Barr によって提出された。線型空間がよい例になっている。 $\ast$ -autonomous 圏のうち、よりよい性質をもったものは Chu 空間と呼ばれ、V. Pratt などによって注目されている。

(2) P. Johnstone: On near-toposes of coalgebras

John Power、辻下徹、渡邊宏、J. Worrell との共同研究。P. Johnstone も Cambridge 大学純粋数学科の reader。

Coalgebra は、遷移系の上に自然に現れるので、endofunctor が作る coalgebra は並列計算の意味論の研究に重要である。一方、comonad の Eilenberg-Moore 圏の対象も coalgebra と呼ぶべきものだが、これは、endofunctor の coalgebra の特別な場合になる。本講演では、endofunctor の作る coalgebra がトポスになるための十分条件を、comonad の Eilenberg-Moore 圏と関連させることによりいろいろ与えた。

(3) Landin session

Peter Landin は Queen Mary の教授で、 λ 計算がプログラミング言語の意味論に使えることを指摘した人として有名。彼を讃えるセッションが企画され、J. Reynolds、M. Mauny、O. Danvy、C. Talcott などが講演した（が、本人はついに現われずじまい！）。Reynolds によると、 λ 計算との関係の指摘の他にも、抽象構文、糖衣構文 (syntax sugar)、ストリーム、continuation の研究で話題になる J-operator、環境の概念などなどの導入が、少なからず Landin に負うという。

O. Danvy の講演は興味深かった。彼は λ 計算の ML による二種類の実現を提示した。一つは通常の抽象構文を用いるもの、もう一つは高階の抽象構文を用いるものである。そうして、evaluator を書くには、通常の抽象構文と高階のものとの間の翻訳が本質的に必要なことを示し、2-レベルの λ 計算で用いられるのと同様のテクニックを使って evaluator を書いた。高階の抽象構文の問題点の一端を示した。

4.4.4 Basic Research In Computer Science (BRICS)

BRICS は Basic Research In Computer Science の略で、オーフス (Århus) 大学とオールボリ (Ålborg) 大学の計算機科学科が共同で運営する研究組織である。1994年から活動している。実際の活動は学科組織と BRICS の二重構造をうまく利用しながら進めており、この点は、後に述べるエディンバラ大学 LFCS と同様である。今回はこの組織を作るのに大きな役割を果たした Glynn Winskel 教授とそのグループを訪ねた。

(1) Glynn Winskel

BRICS のリーダ格の教授。並列計算の意味論を研究している。並列計算には、ペトリネット、遷移系、 π 計算などなど、いろいろのモデルがあるが、Winskel は、それらのモデルの間の関係をしらべたり、各モデルの共通部分を抽出して、より抽象的なモデルを提案したりしてきた。とくに90年代にはいつてからは、遷移系が前層や米田埋込を用いて説明されることを示しており、この仕事を発展させて、現在 Profunctor のつくる双圏の構造を研究している。この双圏の中で領域方程式を解こうという計画である。現在、博士課程の学生の Gian-Luca Cattani や Sussex の M. Fiore と共にこの方針での研究を進めている。

(2) Olivier Danvy

Associate Professor。強いプログラミングの経験がある。Partial evaluation, continuation, CPS (continuation passing style) など、プログラミングと理論のはざまにあるテーマの研究をしている。オース大学ではプログラム意味論の講義を Winskel と共に担当している。MFPS で面白い講演をしたことは上述した。

(3) P. Selinger: Control Categories

Long term visitor (ミシガン大学数学科 associate professor)。H. Thielecke が continuation passing style を説明するのに用いた テンソル圏について考察し、control category と称する圏を定義、そのなかで、値呼びの λ 計算と名前呼びの λ 計算が双対になることをはっきりと示した。これは '90 前後に A. Filinski が観察していた現象を完全に説明する。この内容は MFPS でも講演された。

(4) 筆者の講演

Equivalence proof of coherence theorems and normalisation by evaluation --- a special case for monoids --- という、少し長い題で講演した。特殊な場合の話なのだが、意外に興味を持ってくれた。また、思ったより応用範囲の広いことが Olivier Danvy との会話で明らかになった。

4.4.5 University of Edinburgh

エディンバラ大学 LFCS に John Power 博士 (senior research fellow) を訪問した。LFCS (Laboratory for Foundations of Computer Science) は 80 年代半ばから活動しており、当初は Alvey 資金を基に立ち上げられた組織だが、現在では multi fund で、各研究員が取得してくる ESERC や ESPRIT の研究資金で運用している。BRICS と同様、計算機科学科との二重構造をうまく使って実際の活動を行っている。今ではプログラム意味論、並行計算論、計算量理論などにおいて強力なグループを構成している。メンバーは PhD 学生 (イギリスでは research student と呼ばれている。彼らはたいてい、十分自活できるだけの奨学金をどこかから得ているので、給料を貰って研究している助手とあまり変わらない) を含めて数十人、うち教授 4 人 (イギリスの制度では大変多いと言える)、reader 3 人、senior lecturer 2 人。なお、最近、エディンバラでは計算機科学科、人工知能学科、認知科学センター、AIAI などが共同して Informatics (情報学) の組織 (学部と学科の中間くらいの単位らしい) を作って連携を進めている。旧世代では、計算機科学科と人工知能学科は互いに反目しあって、連携が難しかったのだが、やっとそのような反目が薄れてきてきたのだとか。

(1) Ewen Denney

Denney の博士論文の内容である、refinement calculus と refinement logic の両方をもつ体系について、詳細に説明を聞いた。

(2) Don Sannella and Jo Hanne

隠蔽ソートについて、Sannella (Reader, Director of LFCS), Hanne (Sannella の 2nd year PhD student), Power, 筆者の四人で議論した。Hanne らによる隠蔽ソート代数とその等式論理における特徴付けをきき、さらに、Power と筆者が隠蔽ソート代数の圏論的説明を与えた。

(3) John Power

P -圏の伝統的な圏論の流れに沿った説明について議論した。それに付随して、部分同値関係 (partial equivalence relation) をもつ集合のなす圏がもちうる symmetric closed monoidal structure の特徴付けを考察した。その構造の数は有限個ではないが、かなり絞り込むことができた。

【Konstantinos Tourlas】

回路設計のための図式言語 (IEC によって規格化されているもの) の主要な部分が、traced monoidal category によって説明できることを Kostas (S. Anderson (senior lecturer) の学生、博士課程二年生) が話してくれた。Traced monoidal category は feedback を定式化するのに適した概念である。組み紐の理論から派生した概念だが、二年ほど前に、graph reduction における recursion を traced monoidal category によってうまく説明できることが M. Hyland と長谷川真人 (Edinburgh, 現在京都大学) によって独立に示され、計算機科学からは、表示的意味論と操作的意味論を繋ぐための概念として注目を集めている。

(1) Carsten Fuhrmann

H. Thielecke は CPS (continuation passing style) calculus のモデルをテンソルついで圏によって構成したが、より整理した概念によるモデル構成を Carsten (J. Power の学生、博士課程二年生) が聞かせてくれた。Thielecke による理論の数学をすっきりさせた仕事である。

5. 複雑系研究の動向

ー複雑系研究マップー

5. 複雑系研究の動向 ―複雑系研究マップ―

本調査は、日本および欧米諸国において現在実施されている複雑系に関する研究動向を調査、分析し、現在の複雑系関係の研究動向を分かりやすく把握することを目的とした複雑系研究マップを作成するために実施した。調査はまず、既調査データの分析として、平成9年度に実施された「知的情報技術と利用の動向に関する調査研究報告書―複雑系情報処理に関する調査研究―」で報告されたデータの分析を行ない、その後、その調査で空白となっている領域を重点的に調査するとの方針で行った。情報収集は、主として文献調査およびWWW上に公開されている情報の検索により進めた。国内における複雑系研究に関しては、各研究者/研究機関が作成しているホームページ他、論文集、文献データベースなどを中心に情報を収集した。また、欧米諸国における複雑系研究を行なっている研究機関として米国 Santa Fe Institute と交流のある研究組織を中心に選定し、調査を実施した。

構成は次の通りである。まず、日本国内における複雑系研究の実態調査を行ない、その結果としてまとめた研究マップの作成手順とその調査分析結果を第5.1節で述べる。次に第5.2節で、欧米諸国における複雑系研究の実態をまとめた研究マップの作成手順およびその調査結果を報告する。以上の分析を踏まえ、最後に第5.3節で複雑系研究の傾向を考察としてまとめる。

5.1 日本国内における複雑系研究の実態調査

日本国内における複雑系研究の実態調査は、以下の手順で実施された。

まず、平成9年度にまとめられた複雑系に関連する国内における研究マップの整理と分析を行なった。この研究マップは、知的情報技術動向調査委員会の複雑系情報処理調査専門委員会により昨年度に実施された「知的情報技術と利用の動向に関する調査研究―複雑系情報処理に関する調査研究―」と題する調査によってまとめられたものである。

次に、研究対象や研究規模などの軸を選定し、研究マップの作成する準備を整えた。そのマップに既存事例を当てはめ、研究動向を把握すると共に、既存調査で調査不足の可能性のある領域を特定した。

さらに、上記の分析において調査不足と思われる領域に関し、追加調査を実施した。追加調査は主に、研究者自身が公開しているホームページや、論文集、文献データベースなど公開情報に基づき情報を収集した。追加調査を実施し十分な研究項目を調査した後に、最終的にいくつかの角度から研究マップを作成し、日本における複雑系研究の現状を分析した。

5.1.1 既存調査範囲の分析

日本国内における複雑系研究マップを作成するにあたり、まずは平成9年度「知的情報技術と利用の動向に関する調査研究報告書－複雑系情報処理に関する調査研究－」第4章「複雑系研究マップ」に記載されているデータを整理し、内容の更新を行なうとともに既存の調査範囲の分析を行なった。

(1) 既存調査情報の更新

まず足掛かりとして、既に存在する部分の情報の更新を行なった。「知的情報技術と利用の動向に関する調査研究」で作成された複雑系研究マップは、ほぼ研究者ごとにまとめられている。その対象研究者は表5.1-1に挙げた109名であり、その109件に、情報処理学会の「知能と複雑系」研究会、および横浜国立大学工学部知能物理工学科の2件を加えた111件が上記の研究マップで報告されている。

表5.1-1 既存調査で登録されている研究者一覧（敬称略）

赤間 清、宮本 衛市、渡辺 治、相原 正樹、大内 東、合原 一幸、大石 進一、佐々木 逸雄、嘉数 侑昇、鈴木 恵二、広瀬 貞樹、三田村 保、古橋 武、山川 修、塩沢 由典、山口 昌哉、中村 量空、斉藤 信彦、足立 聡、金野 秀敏、上田 正則、米澤 保雄、金子 邦彦、沢田 康次、朝倉 俊行、井上 政義、松葉 育雄、谷 淳、都甲 潔、木本 昌秀、佐々 真一、樋口 三郎、堀田 武彦、氷上 忍、辻下 徹、長谷 博行、米田 政明、西田 孝明、木上 淳、熊谷 隆、久保 雅義、日野 正訓、船越 満明、藤坂 博一、野木 達夫、山本 裕、磯 祐介、池口 徹、香田 徹、石塚 智、相澤 洋二、渡辺 慎哉、横井 浩史、和田 充雄、三上 貞芳、平田 健太郎、渡邊 昭義、宮崎 修次、金子 豊、田中 泰明、大場 一郎、小林 孝次郎、鵜飼 正二、原 辰次、松野 文俊、伊藤 宏司、三宅 美博、中野 文平、丸山 次人、西谷 卓史、内山 隆、中村 喜代次、潮 俊光、土橋 敏明、川村 清、萩原 将文、吉川 研一、高橋 聡、石井 良夫、嶋田 正和、庄司 正弘、染田 清彦、堤 敦司、等々力 賢、藤島 実、市村 宗武、木村 英紀、国場 敦夫、野村 正雄、松浦 弘幸、山本 義春、伊藤 耿一、小川 哲生、徳田 功、雨森 道紘、森 教安、千葉 訓司、吉岡 宗之、福田 浩昭、矢内 浩文、堀尾 喜彦、成瀬 継太郎、松本 健司、柳田 達男、行木 孝夫、桐木 紳、大澤 幸生、山口 俊和、池田 誠

これらの全ての項目に関して、各研究者が公開しているWWWの情報を検索し、情報の更新を行なった。

情報の更新を行なった結果は、分析を行ないやすいように、また研究マップを作成することを睨み、組織ごとにとりまとめた。その詳細は次節以降で述べる。ここでは、

更新の際に判明した事実および変更箇所を挙げる。

(a) 異動した研究者

研究者の異動により情報の更新が必要となった研究者を以下に挙げる。氏名に続く URL は、異動先で提供している情報を示す URL である。

三田村 保 <http://www.asahikawa-med.ac.jp/ippan/mis/mitamura.htm>

北海道大学工学部システム情報工学専攻複雑系工学講座の助手として登録されていたが、旭川医科大学に異動した。

金野 秀敏 <http://www.esys.tsukuba.ac.jp/19.html>

筑波大学物質工学系と登録されていたが、「全国大学職員録(平成10年度)」によると、筑波大学 電子・情報工学系の所属となっている。

平田 健太郎 <http://www.ecs.ees.osakafu-u.ac.jp/staff/kent/>

京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻の助手から、大阪府立大学工学部電気電子システム工学科電気システム制御研究グループの講師に異動。

小林 孝次郎 http://www.t.soka.ac.jp/InfoSys/staff/k_kobayashi.html

東京工業大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻教授から、創価大学に異動した。

吉川 研一 <http://moomin.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

名古屋大学大学院人間情報学研究科の教授として登録されていたが、京都大学大学院 理学研究科物理学宇宙物理学専攻に異動。

松浦 弘幸 <http://www.biomed.grips.ac.jp/j.html>

東京大学先端科学技術研究センター、人工生体機構分野の所属となっていたが、現在その組織には情報がなく政策研究院の助教授に異動し、高齢社会プロジェクトに関わっている。

(b) 詳細不明の研究者

WWW で情報公開が行なわれていないため現在の詳細な情報を入手することが、できなかったもの、および、既に登録されている情報と WWW で現在提供されている情報に相違があったものを次に挙げる。

佐々木 逸雄

大阪府立大学工学部経営工学科の教授として登録されていたが、実際には1998年4月の時点で数理・情報科学科の助教授である。昨年度データとして登録されてい

る URL の実体は大阪府立大学工学部数理工学科の非線形力学研究グループのホームページを指している。その研究室に所属している研究者は田尻昌義教授、中西哲夫講師、福田 浩昭助手であり、福田浩昭助手のみ既に登録されている研究者であった。

足立 聡

東京工業大学理学部応用物理学科に所属と登録されていたが、「全国大学職員録(平成10年度)」(広潤社)によると東京工業大学理工学研究科物性物理学専攻分子物理学に所属していると記載されている。WWW による情報提供は無い。

渡邊 昭義

京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻の助手と登録されているが、現在の所属は不明である。

嶋田 正和

WWW では、大学による研究者データベースの情報のみ得ることが可能で、個人あるいは研究室による情報提供は無い。

斎藤 信彦

昭和63年に早稲田大学を定年退職しており、現在は早稲田大学の名誉教授である。WWW による情報提供は行なわれていない。

(c) その他

その他、特記事項を述べる。

山口 昌哉

龍谷大学理工学部数理情報学科教授として登録されていたが、1998年12月に逝去したことが判明した。なお、逝去の情報の入手には、共同通信社の記事検索を利用した。

横浜国立大学工学部知能物理工学科

新学科の発足準備団体として複雑系もターゲットに入れているとの観点から、複雑系研究組織として登録していたものと考えられる。しかし、実際には通常の物理学科あるいは物理工学科に近く、複雑系関連の情報を幅広く収集することを意図するとしても、学科の性質からこの学科全てを複雑系研究組織として取扱うのはやや無理がある。

また、各研究者または所属組織が WWW で提供している情報には「複雑系」といった単語あるいは「カオス」や「自己組織化」などの用語が陽に現れず、現在も複雑系

の研究を行なっていると分類してよいかどうか判断し難いケースがいくつか存在した。

(2) 登録形式の変更と再編成

情報の確認と更新を行なった項目に関しては、次の手順で研究マップを作成することを考慮して、研究者単位の複雑系研究情報の登録から組織ごとの登録に形式を改めた。具体的には、表 5.1-2 に示すフィールドをもつレコードを作成し、収集した情報の再編成を行なった。

研究分野は、『日本十進分類法(NDC)』に採用されている分類表記をもとに対象領域の一覧を作成し(表 5.1-3)、その中から適当であるものを選択した。研究分野一覧は、『日本十進分類法(NDC)』から主として「学」の付く領域を抜粋し、次の方針に基づき構成したものである。すなわち、抜粋したリストから文学関係および図書・書誌学は除外し、社会科学に分類されているものについて個別に採用する。さらに多少の修正を加えたものに、分類にあたってとくに必要と思われる新たな分野(「情報工学」など)を加え、一覧とした。

また、研究領域として、その組織で行なわれている研究が基礎から応用までのどのレベルに位置付けられるかの大きな分類を行なった。分類にあたり、得られた研究内容の情報や、その他の Web で公開している情報を利用し表 5.1-4 に示した項目に分類した。以上の手順で取りまとめられたレコードの一例を表 5.1-5 に示す。

表 5.1-2 複雑系研究の組織別分類

フィールド名	内容
研究分野	情報工学/物理学/経済学など、表 5.1-3 から選択
研究領域	基礎から応用までの位置付け
研究規模	人数で評価する。 大学の研究室やそれに類した組織の場合は、教官と修士以上の学生および研究生を研究者として数え、その他の組織やプロジェクトの場合は、所属人員の総数を数えた。
代表的な研究者	その研究室/研究組織に所属する代表的な研究者名を挙げる。 企業その他の研究組織については組織長やプロジェクトリーダー、または主要な委員会メンバなどを対象とし、大学の研究室や講座の場合は、教授・助教授・講師・助手を並べた。
組織名称	組織の名称
研究概要	WWW で研究内容を公開している場合、そのページの要約
キーワード	研究内容を公開しているページに記載されている文章のうち、色・字体・下線・ハイパーリンクなどで強調されているものを抜粋した。
URL	関連するホームページの URL
研究組織形態	大学/民間/国立研究所/その他の分類

表 5.1-3 研究分野一覧

哲学、心理学、倫理学、政治学、法律学、経済学、
財政学、統計学、社会学、教育学、民族学、
数学、物理学、化学、天文学、宇宙科学、地球科学、
地学、地質学、生物科学、一般生物学、植物学、
動物学、医学、薬学、獣医学、歯学、
建設工学、土木工学、建築学、機械工学、原子力工学、
電気工学、電子工学、海洋工学、船舶工学、金属工学、
鉱山工学、情報工学、制御工学、
言語学、家政学、生活科学

表 5.1-4 研究領域一覧

基礎研究・理論
モデル・複雑系研究ツール
数値計算・計算機シミュレーション
応用システム
実証実験・予測

表 5.1-5 組織別複雑系研究事例

研究分野	情報工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	10名
代表的な研究者	宮本 衛市, 赤間 清, 渡邊 慎哉
組織名称	北海道大学 工学系研究科 システム情報工学専攻複雑系工学講座 表現系工学分野
研究概要	人間の意志をコンピュータに伝えるための計算の仕組みを研究している。コンピュータに高度な知能を与える方法、人間とコンピュータ間の意思疎通に用いる言語、問題解法の研究など。 主な研究対象はプログラム言語、自然言語理解、並列計算、人工知能、学習システム。
キーワード	プログラム言語, 人工知能, 学習システム
URL	http://lis2.huie.hokudai.ac.jp/
研究組織形態	大学

(3) 組織ごとの分類に関する諸注意

(a) 研究分野と研究領域の分類

研究分野の分類に関し、その組織内で複数の研究者が研究を行なっているため、組織によっては様々な分野の研究を行なっている場合がある。そのような場合は、とくに極端に他分野の研究を行なっているようなケースを除き、複数の研究分野に分類することを認めた。

一方、研究領域の分類に関しても研究分野の分類と同様な注意が必要で、複数の研究者が各自の研究を行なっている事情により基礎から応用まで幅広い領域を対象として研究を行なっている場合がある。研究領域に関しては、以下のように対処することで分類を行なった。

表5.1-4に挙げた指標は、基礎から応用の順序で上から下に並んでいる(図5.1-1)。応用に位置付けられる手法は、基礎に位置付けられた研究の結果を利用する研究領域となる。

例えば、計算機シミュレーションを行なうにはモデルの利用が不可欠であり、そのモデル構築の背景には基礎理論が存在する、という構造になっている。

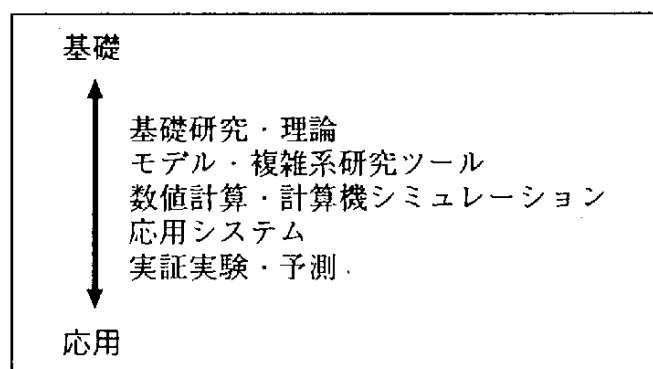


図5.1-1 研究領域

そこで、各組織を一行に並べることが可能になるように研究領域の取り扱いを次のようにした。

1. 「応用システム」と「実証実験・予測」のように、図5.1-1において隣接する領域に関してはその中間に分類するものとする。
2. 「基礎研究・理論」と「応用システム」のように広範囲な領域に対して研究を行なっている場合は、どちらか主として研究対象とされている領域を全体の研究領域とする。

なお、例えばカオスを中心にした研究を分類する場合、カオスそのものを対象にしている研究は基礎研究色の強い「基礎研究・理論」や「モデル・複雑系研究ツール」の領域に分類し、カオスを利用した複雑系研究の場合には、「応用システム」や「実証実験・予測」の領域に分類した。

(b) 複雑系研究者と研究組織の対応

個人別の調査から組織別の調査に形式を変更したことに関し、組織と個人の対応状況に応じてやや問題が生じた。複雑系研究の定義自体が曖昧であることに加え、学際的な研究形態であることや、複雑系そのものを組織的に研究している団体はまだそれほど多くないとの理由から、下記のような不都合があった。

研究者と組織の対応をとる場合に、その研究者が所属している研究組織の研究対象が複雑系そのものを研究しているとは限らない。したがって、個別に対応を考慮せねばならず機械的な再編成処理は困難である。既に複雑系研究者として登録されていた研究者の所属している組織は、以下の4つの形態に分類することができる。

① 組織として複雑系を研究している研究組織

主として複雑系研究を目的として作られた組織において、複雑系関連の研究を行なっている場合である。

北海道大学大学院工学系研究科の複雑系工学講座の各分野、あるいは京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻の各分野などが相当する。

② 複雑系の関連領域の研究を行なっている組織

非線型力学やシステム工学などが研究室の主な研究テーマであり、そのうちのひとつのアプローチとして複雑系研究も行なっているというような研究組織である。東京大学教養学部物理部会の数理物理学研究室などが相当する。

③ 複雑系研究組織だが研究の実態はやや異なる組織

組織名称としては複雑系を表現する文字が与えられており、複雑系研究組織として位置づけられているものの、その研究内容の実態や組織の目指す研究方向が複雑系とはやや異なる研究組織である。

東京工業大学大学院総合理工学研究科の複雑システム解析講座、感覚適応系行動制御分野西谷研究室などがこの場合に相当する。

④ 複雑系と関連のない研究を行なっている組織

組織としては複雑系とは全く関連のない研究を行なっているが、対象の研究者が個人的に複雑系関連の研究を実施している場合である。

ソニーコンピュータサイエンス研究所の谷淳氏や、東京大学大学院教育学研究科身体教育学研究室の山本義春教授などがこの場合に相当する。

組織別の情報収集に形式を改めるにあたり、まず①のケースは問題なく、既に情報が集められている研究者が同一の組織に複数所属している場合は単に集計するといった程度の注意を払うだけでよい。

②～③の場合はやや判断が難しい。今回の調査では、②に相当するものは登録することとし、③に相当するもので明らかに研究対象が異なると判断できるものに関しては除外した。

④の場合は組織として複雑系研究組織と定義し得ないので、場合に応じて個人として登録した(この場合、「組織」はその個人が所属する組織名称とした)。

(4) 既存調査情報の傾向分析

既に調査済の複雑系研究者の情報を、組織別にまとめ直したところ、複雑系関連研究を行なっている組織のうち調査済のものの総数は66件となった。研究マップの作成および追加調査を行なうために、まずは既存の調査分に関して、次の観点から傾向の分析を行なった。

(a) 研究分野

研究分野に関し、関係する組織の数が多い順に並べたものが、表5.1-6である。ただし、表5.1-6にはその分野を研究している組織の度数が2以上のものだけを記載した。

表5.1-6 研究分野ごとの集計

研究分野	度数	研究分野	度数
情報工学	23	物理学 生物科学	2
物理学	16	電子工学 生物科学	2
生物科学	15	生物科学 制御工学	2
数学	14	生物科学 数学	2
生物科学 情報工学	10	生物科学 化学	2
制御工学	9	制御工学 情報工学	2
機械工学	6	制御工学 機械工学	2
物理学 数学	5	情報工学 機械工学	2
電子工学	5	原子力工学	2
化学	4	経済学	2
情報工学 数学	3		

各分野および複数の分野の度数を数えるにあたり、それらの分野を含む分野を対象とした研究を実施している組織は全て集計する方法を採用した。例を、図5.1-2に示す。

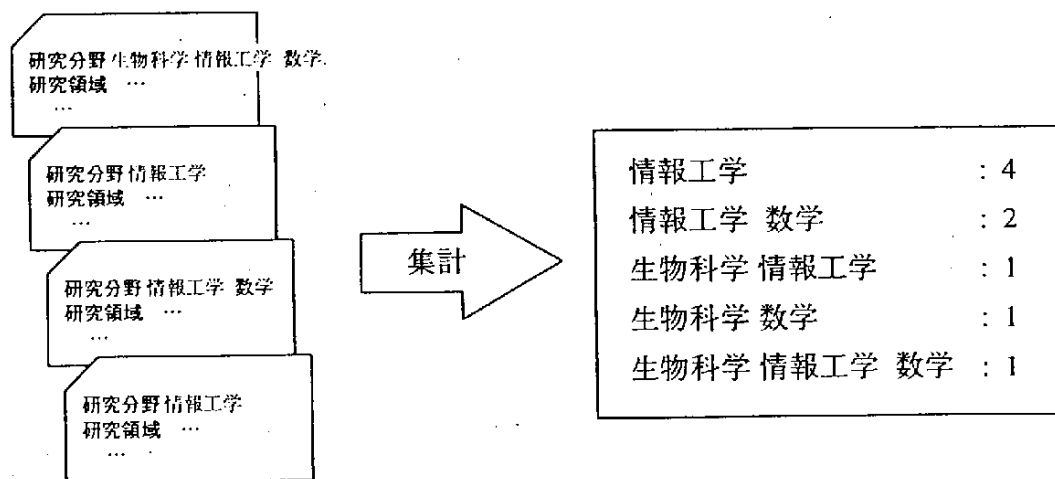


図 5.1-2 研究分野の集計の例

表 5.1-6 を見ると、全 66 件のうち約 2/3 の 23 件が情報工学に関わっていることが示されている。複雑系研究を実施するためには計算機の活用が不可欠であり、したがって情報工学の要素が各分野に互ってまんべんなく要求されている。そのため、本質的には他分野の研究組織でありながら、情報工学にも分類された研究組織が多かったものと考えられる。また、次に述べるように、生物科学と密接に連携した研究が多いことも要因のひとつである。

先に述べた集計方法では、何らかの形でその分野が関与していれば 1 度数として数えられるので「情報工学」や「物理学」といった単独の研究分野が多く数えられることになるが、「生物科学 情報工学」の組合せが 10 件と 2 割近い割合を占めていることが非常に特徴的である。これは、既存の調査範囲に、脳や神経をモデルとした生物情報処理の理解・応用をテーマに掲げている研究組織が、多く含まれていたことによる。生物科学に関係している研究組織の数が 15 件でありながら、その 2/3 に相当する 10 件が情報工学と組合わされて分類されていることから分かる。

なお、生物科学に関しては、生物科学のみを研究分野としている組織は既存の調査範囲には存在しなかった。関連する研究組織は全て、情報工学や電子工学などと共に分類されている。このことは、複雑系の科学の対象のひとつとして生体という複雑系を取り上げ、工学的アプローチによる問題解決を図るといった、複雑系の科学の手法のひとつが端的に現れているといえよう。

情報工学の他は物理学と数学の割合が高い。これらは、次の項で述べる研究領域に関して基礎研究の傾向が強いことと関連しており、それぞれの分野における基礎的な研究を行なっている組織が多いことに加えて、複雑系研究のツールとしての数学あるいは物理学を研究している組織が多い結果である。

自然科学系の複雑系研究が多い一方で、経済や社会を対象とした研究が比較的少な

い。複雑系研究の対象は、経済学や人間行動学など社会科学系の学問まで幅広く広がっていることを考慮すると、これらの領域の調査はまだ不十分といえる。

(b) 研究領域

次に、研究領域について分析を行なった。本項(3)(a)「研究分野と研究領域の分類」で述べた通り、研究領域に関しては、基礎から応用までの5段階を設定し、さらにそれぞれの中間段階を加えた合計9つのレベルに分類した。既存の調査範囲について分類した結果を、表5.1-7および図5.1-1に示す。

表5.1-7 研究領域ごとの集計

研究領域	度数
基礎研究・理論	26
...	5
モデル・複雑系研究ツール	5
...	1
数値計算・計算機シミュレーション	7
...	2
応用システム	15
...	3
実証実験・予測	1
(不明 1)	

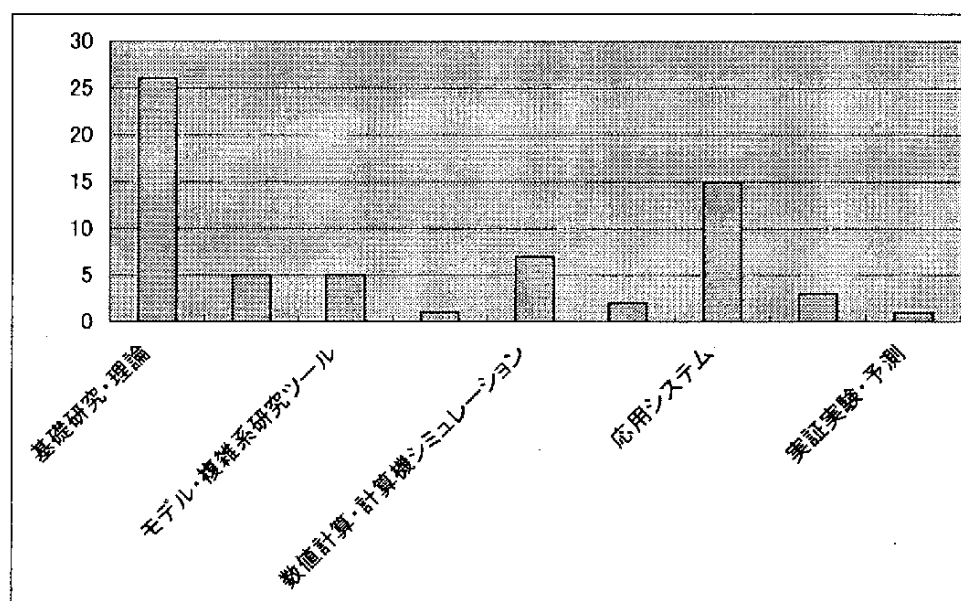


図5.1-3 研究領域

既存の調査範囲では、圧倒的に基礎研究の比率が高い。「基礎研究・理論」と「モデル・複雑系研究ツール」の両範囲を広く研究している組織も含めると、合計 31 件と全体のほぼ半数近くを占める。これは、後述するように既存調査範囲には大学での複雑系研究が多いためである。

また、複雑系の手法を利用して各分野の研究に応用するといった形式の組織も比較的多く、対象の分野もバラエティに富んでいるために、「応用システム」に分類された組織も多くなっている。しかし、これらの研究組織が実施している研究のほとんどはまだ研究室レベルといったところである。実システムへの適用や、実証実験の実施、あるいは実世界の分析や予測まで応用を進めている研究組織は少ない。

(c) 研究規模

さらに、既存の調査結果を研究規模で分類した。その結果を表 5.1-8 および図 5.1-4 に示す。次項の (d) で述べるように、ほとんどの組織が大学の研究室となっているため比較的小さな集団の組織が多い。既存の調査範囲では、6 名から 10 名までの規模の研究組織が最も多く、2/3 以上が 20 名以下の組織である。

(d) 研究組織形態

研究組織の形態については、表 5.1-9 に示すようにほとんどが大学の組織である。唯一の民間組織はソニーコンピュータサイエンス研究所、その他の組織は、情報処理学会の「知能と複雑系研究会」であった。

表 5.1-8 研究規模ごとの集計

研究規模(人数)	度数
26名以上	4
21名～25名	5
16名～20名	10
11名～15名	13
6名～10名	19
5名以下	6
(うち1名	3)
不明	9

表 5.1-9 研究組織形態ごとの集計

組織形態	度数
大学	64
民間	1
その他	1

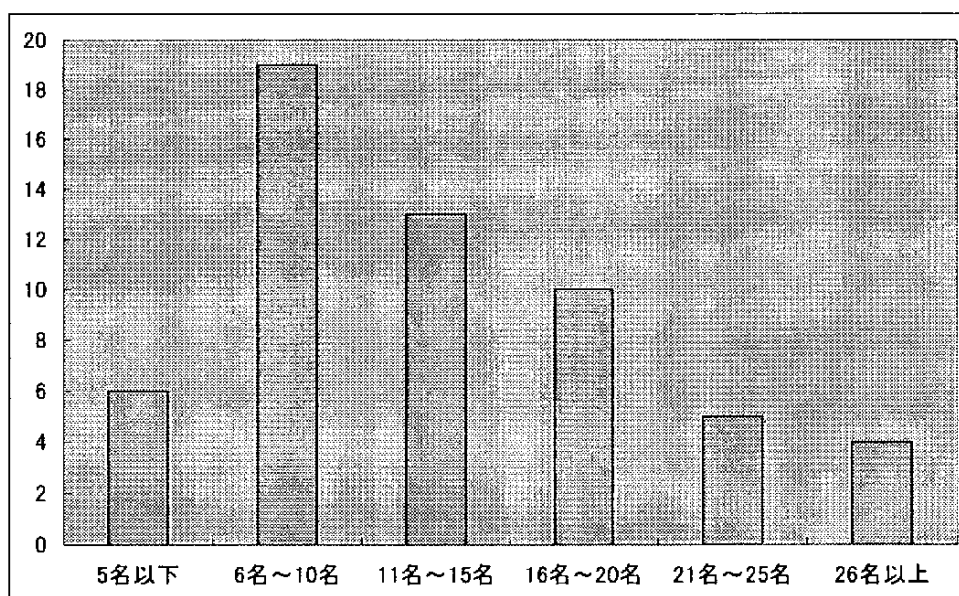


図 5.1-4 研究規模

5.1.2 追加調査

前項では、「知的情報技術と利用の動向に関する調査研究」において実施された国内における複雑系研究動向調査結果の内容を更新するとともに、組織別の構成にまとめなおし、調査範囲および内容の分析を行なった。その結果、内容などの観点から収集項目に偏りが認められたので、追加調査を行ない、複雑系に関する研究データの幅広い収集を試みた。本項では実施した追加調査の対象・手順とその調査結果を報告する。

(1) 追加調査対象

追加調査は、可能な限り広範囲にデータ収集を試みることを目標に実施された。そこで、主に前項の分析で提示した既存調査範囲の穴を埋めることを中心として追加調査対象の選定を行なった。

前項の表 5.1-9 が示す通り、既存の調査で集計された複雑系研究のほとんどは、大学の研究室で行なわれているものである。また、研究分野に関しては、情報工学関連の研究が圧倒的に多く、経済学など、情報・物理系以外の複雑系研究組織の情報が少ない。

一方、大学の研究組織においても、東京大学に新設された新領域創成科学研究科の複雑理工学専攻や、あるいは金沢大学理学部物理学科の複雑系物理学講座、琉球大学工学部情報工学科に属する複雑系工学研究室などのように、組織名称として明示的に複雑系(あるいはそれに関連する名称)が折り込まれている組織が網羅されていない。

追加調査ではこれらの研究組織に関してもデータ収集を実施し、調査範囲の拡充を試みた。

以上の方針により、次に挙げる基準で対象を選定し追加の調査を実施した。

大学以外の複雑系研究組織

企業、民間団体、国立研究所、学会などの調査。

複雑性議論集団DGC(Discussion Group on Complexity)

未来工学研究所、富士総合研究所、国際高等研究所、電総研、など

産官学にまたがる複雑系研究組織

セミナー、研究会、その他研究団体の調査。

東京複雑系(若手研究者による研究グループ)

慶應義塾大学 理工学部 未来開拓学術研究プロジェクト

奈良女子大学 理学部 物理科学科 複雑系理論セミナー、など

情報・物理系以外の複雑系研究組織

経済学、その他の情報・物理系以外の研究分野において複雑系研究を実施している 組織の調査。

経営情報学会「主体を含む複雑系」研究グループ、進化経済学会

京都大学 経済学部 出口研究室、など

大学における複雑系研究組織(未調査のもの)

新設の複雑系研究組織、その他、組織として複雑系を研究している研究組織の追加調査。

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻

お茶の水大学大学院 人間文化研究科 (博士後期課程) 複合領域科学専攻 複雑系科学講座

琉球大学 工学部 情報工学科 複雑系工学研究室、など

(2) 調査手順

追加調査は WWW で提供されている情報の検索を中心に行なった。infoseek、goo などの検索エンジンを利用し、「複雑系」、「Complexity」など複雑系に関連する単語を主キーとし、さらに「経済学」など必要なキーワードで絞り込み検索を行なった。また、検索エンジンによっては、URL に含まれる文字でフィルタリングしたり、特定

のドメインを対象として検索を行なうことが可能である。例えば、infoseekでは、検索フレーズに +site:co.jp と指定することで、co ドメインのみを対象とした検索を指定できる。

<http://www.etl.go.jp/%7Eyoshiki/complex-systems.html>
<http://www.etl.go.jp/%7Eshiro/link/chaos.html>
<http://www.narc.affrc.go.jp/pub/mituhasi/complex.html>
<http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/%7Efujisaki/physics.html>
<http://www.asahi-net.or.jp/%7Enr9h-atm/Complex/links.html>

図 5.1-5 複雑系研究リンク集(国内)

また、図 5.1-5 に示すように、複雑系関連研究者自身によってまとめられている複雑系関連リンク集がいくつか存在する。本調査では、これらの情報も参照し、関連情報を収集した。ただし、これらのリンクに関しては、そのリンク集をまとめている複雑系関連研究者の研究分野が中心となっている傾向にあり、一般的な複雑系研究以外にその分野に特化して広くまとめられていることが多い。今回の調査では、これらのリンク集を参考にした場合は、リンク先の内容に立ち入り、その研究内容の記述において複雑系研究を明記しているか否かを選択の基準とした。

これらの方法を組合わせ、追加調査対象の選別と、内容の収集を行なった。その他、JICST が提供している日経産業新聞および日刊工業新聞記事データベースも参照した。

(3) 調査結果

前述した方針に基づいて追加調査を実施した結果、以下の項目に関して研究内容を収集することができた。なお、既存調査範囲と一部重なるものや、1997～1999 年度(予定を含む)で組織改正が行なわれたもの、現状として複雑系研究を実施しなくなったものなどがあり、第 5.1.1 項で述べた分析の範囲にも若干の修正を加えたことに注意しておく(したがって、ここで列挙した項目の総数と前節で分析した項目の総数の合計は最終的な項目総数とは一致しない)。ここでは、追加に調査したものと分析済の既存調査項目を修正したものを区別せず列挙する。

追加調査対象の複雑系研究組織は次の通りである。

大学以外の複雑系研究組織/産官学にまたがる複雑系研究組織

民間、国立研究所、その他の大学以外における複雑系研究組織である。大学の研究者を含む共同研究プロジェクトや学会、その他の団体も含む。

ATR人間情報通信研究所 下原勝憲研究室
株式会社あいはら 研究開発チーム

ソニーコンピュータサイエンス研究所
 北野共生システムプロジェクト
 富士総合研究所 計算科学研究センター
 富士総合研究所 解析技術第一部 複雑系プロジェクト
 富士通総研 研究開発部
 システム総合研究所 複雑系工学研究会
 未来工学研究所 Complexity Science Community
 国際高等研究所「複雑系と社会科学の方法」プロジェクト
 通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 大域情報処理ラボ
 郵政省 通信総合研究所 関西先端研究センター 知識機構研究室
 郵政省 通信総合研究所 宇宙科学部 宇宙計測研究室
 文部省 核融合科学研究所 理論・シミュレーション研究センター
 進化経済学会 非線形問題研究部会
 経営情報学会「主体を含む複雑系」研究グループ(CoSDeM)
 慶應義塾大学 理工学部 未来開拓学術研究プロジェクト
 複雑系物理モデルによる生命情報システムの研究
 文部省 科学研究費補助金採択課題 1998年度基盤研究B
 「形式的方法による複雑系数理の基礎研究」
 農林水産省 農業環境技術研究所 複雑性議論集団DGC
 (Discussion Group on Complexity)
 東京複雑系
 複雑系仮想研究所

情報・物理系以外の複雑系研究組織

情報・物理系以外を研究対象として取扱っているの研究組織のうち、既存調査では 未調査であったものである。ただし、大学以外の研究組織に関しては前項に含め、情報・物理系以外の研究も含むが複雑系全般に研究を実施している組織については 次項に含めた。

専修大学 経済学部 近代経済学(原論) 吉田ゼミ
 京都大学 経済研究所 経済計画研究部門 複雑系経済システム研究拠点
 京都大学 経済学部 出口研究室
 慶應義塾大学 経済学部 伊藤研究会
 東洋大学 経営学部 経営学科 旭ゼミ

大学における複雑系研究組織(未調査のもの)

大学における複雑系に関連した研究組織のうち、既存調査範囲に含まれず、新たに調査した複雑系関連研究組織の一覧である。

山形大学 理学部 物質生命科学科 複雑系物質学研究グループ
 筑波大学 電子・情報工学系 カオス研究室
 筑波大学 工学システム学類 機能工学系 星野研究室
 お茶の水女子大学 大学院 人間文化研究科(博士後期課程) 複合領域科学専攻
 複雑系科学講座
 東海大学 科学技術研究センター 複雑系ダイナミクス研究室
 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻
 複雑系実験大講座 各研究室
 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻
 複雑システム大講座 各研究室
 東京大学 大学院 総合文化研究科 広域システム科学系 物理 池上研究室
 東京大学 大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 関連基礎科学系
 複雑系解析学大講座
 東京農工大学 工学部 物理システム工学科 複雑系研究分野
 東京理科大学 経営学部 経営学研究科 齊藤研究室
 金沢大学 理学部 物理学科 複雑系物理学講座 各研究室
 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 知識システム基礎学専攻
 複雑系解析論講座 中森・橋本研究室
 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 複雑系の科学
 (富士通)寄附講座
 福井大学 工学部 応用物理学科 物性基礎講座
 高エネルギーと複雑系研究室
 名古屋大学 大学院 人間情報学研究科 物質・生命情報学専攻
 情報自然環境論講座/情報処理論講座 峯村・内山研究室
 名古屋大学 大学院 工学研究科 機械情報システム工学専攻
 統計シミュレーション工学講座
 奈良女子大学 理学部 物理科学科 複雑系研究室
 九州大学 大学院 総合理工学研究科 大樹海洋研究システム学専攻
 流体環境学大講座 複雑系物理学研究室
 佐賀大学 理工学部 知能情報システム学科 第5研究グループ
 琉球大学 工学部 情報工学科 複雑系工学研究室

5.1.3 日本国内の複雑系研究マップ

既存の調査情報を更新し(第5.1.1項)、さらに、研究分野や研究領域などの各基準ごとに情報収集が不十分であった範囲に重点を置いた追加調査を実施した(第5.1.2項)。本項では、その結果を整理し、研究マップとして報告する。

なお調査結果の一覧は、付録 A として最後に添付する。

(1) 対象分野別研究マップ

まず、各研究者・研究組織が対象としている分野別に、複雑系研究マップを作成した。複雑系の科学は、学際的に研究されるケースが多く、その研究対象は分野を横断して幅広い事象を取扱う傾向にある。したがって、対象分野を明確に分類することは難しい。今回は、大まかな傾向からいくつかの軸を選定し、その軸を配置した2次元の空間に個々の研究組織をマッピングする方式を採用した。

(a) 軸の選定

表 5.1-10 は、最終的に収集した全ての項目に関して研究分野ごとの集計を、多い順に並べたものである(度数が3以下のものは省略した)。なお集計方法は、第 5.1.1 項(4)「既存調査情報の傾向分析」で述べた方法に準じている。この表によると、最も多い関連分野は情報工学で、以下、物理学、生物科学、数学と続く。

表 5.1-10 研究分野ごとの集計(総合)

研究分野	度数	研究分野	度数
情報工学	46	機械工学	8
物理学	30	電子工学	6
生物科学	26	社会学	6
数学	21	地球科学	5
生物科学 情報工学	15	宇宙科学	5
経済学	12	物理学 情報工学	4
制御工学	10	物理学 化学	4
化学	9	生物科学 数学	4
物理学 生物科学	8	生物科学 化学	4
物理学 数学	8	情報工学 経済学	4
情報工学 数学	8	原子力工学	4

また、複雑系の対象とする分野を大きく「自然科学(医学・歯学を含む)」、「社会科学(人文科学・哲学を含む)」、および「工学」の3つの分野に分類することを考える。表 5.1-3 の研究分野一覧から、各研究組織に関して実際に割り当てられたものを抽出し、大きくこの3分野にあてはめると、表 5.1-11 の通りとなる。

表 5.1-1 1 研究分野の大まかな分類

自然科学	数学、物理学、化学、生物科学、動物学、歯学、地球科学、地学、宇宙科学、天文学
社会科学	経済学、社会学、哲学、教育学、心理学、言語学、財政学
工 学	情報工学、制御工学、土木工学、原子力工学、電子工学、機械工学

(b) 各項目の配置

以上の点を鑑み、数多く分類されている情報工学、物理学から制御工学までの6つの分野を軸として採用することにして、図 5.1-6 の軸に従った配置を試みた。

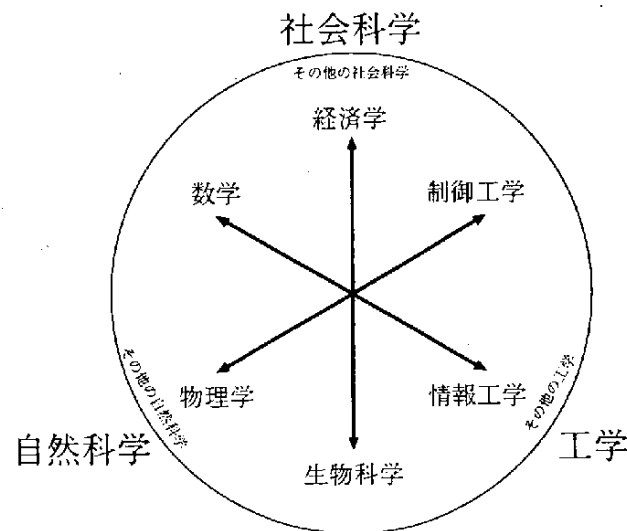


図 5.1-6 研究分野別マップの軸

各軸上には、研究対象がその分野に比較的限定されているような研究組織を並べ、専門性が高いほど外側に配置した。また、複数の対象を研究しているような場合には、各軸の中間に位置するように配置した。例えば、情報工学と生物科学を対象としているような研究は、円の右下に向かう情報工学の軸と、円の下に向かう生命科学の軸の中間の位置に配置される。

一般的に、複数の領域に跨る研究組織ほど円の内側に配置される。円の中心には、複雑系に関するあらゆる分野を対象としているような研究組織を配置した。また、原子力工学や心理学、宇宙科学といった、6つの軸に現れていない研究分野に関しては、他との関係を考慮しつつ円の周辺の領域に配置した。

図 5.1-7 に、各研究組織を配置した結果を示す。なお、この図においては、北海道大学工学系研究科の複雑系工学講座や東京大学新領域創成科学研究科の複雑システム大講座のように、いくつかの研究室をまとめて表示していることに注意する。また、未来工学研究所のComplexity Science Community などのように、研究対象が明確でないものなどについては省略した。

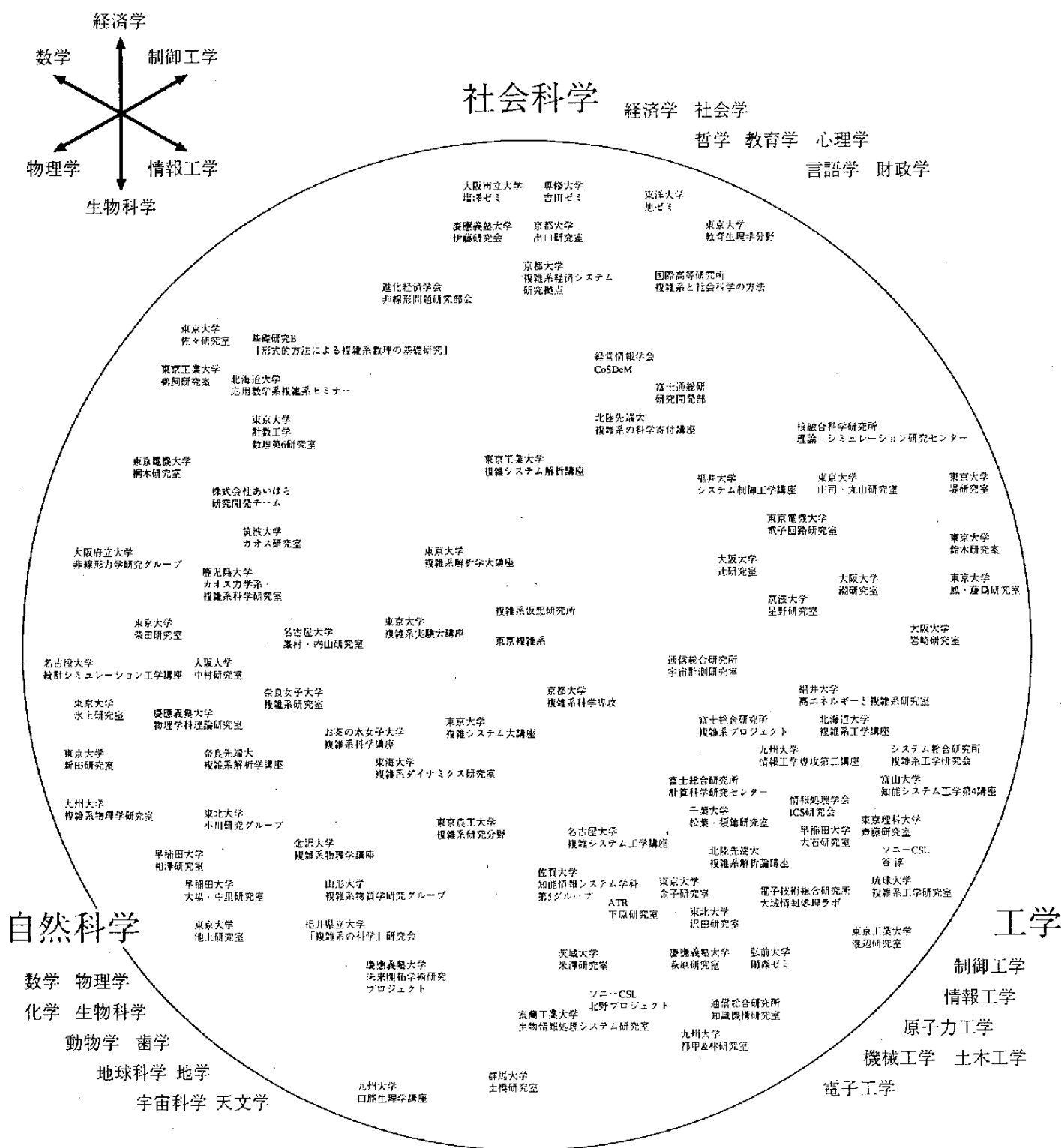


図 5.1-7 国内における複雑系研究の研究分野別マップ

(2) 領域-組織形態別研究マップ

次に、基礎研究から応用、予測・実証実験までの研究領域に関してマップを作成した。まず、全ての収集項目についての分析から述べる。第5.1.1項(4)(b)「研究領域」での分析と同様、基礎から応用までの5段階にそれぞれの中間段階を加えた9つのレベルに分類してまとめたものを表5.1-12および図5.1-8に示す。

表5.1-12 研究領域ごとの集計(総合)	
研究領域	度数
基礎研究・理論	39
...	7
モデル・複雑系研究ツール	15
...	7
数値計算・計算機シミュレーション	15
...	4
応用システム	20
...	2
実証実験・予測	1
(不明 5)	

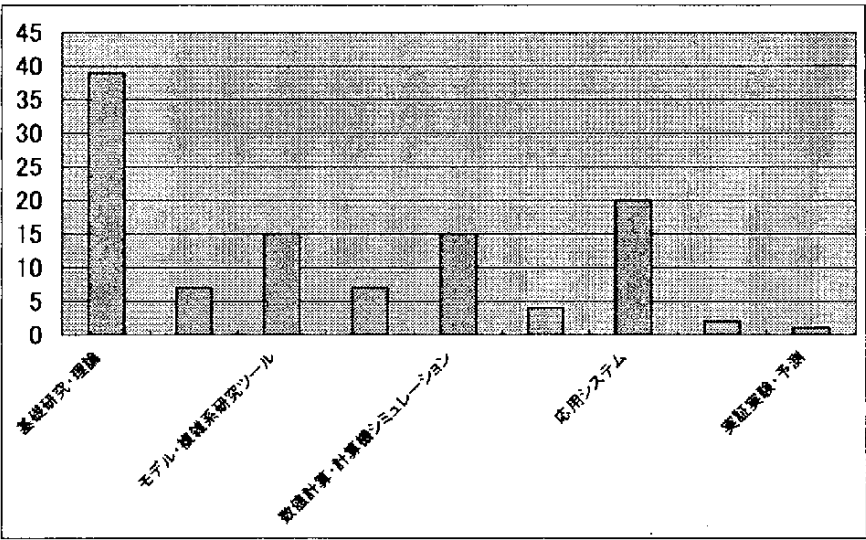


図5.1-8 研究領域(総合)

図5.1-9は、上記の具体的な内容を研究領域別に配置した研究マップである。マップ上、横軸にレベルの種別をとり、縦は大学とそれ以外に分類して順に配置した。



図 5.1-9 国内における複雑系研究の研究領域別マップ(1)

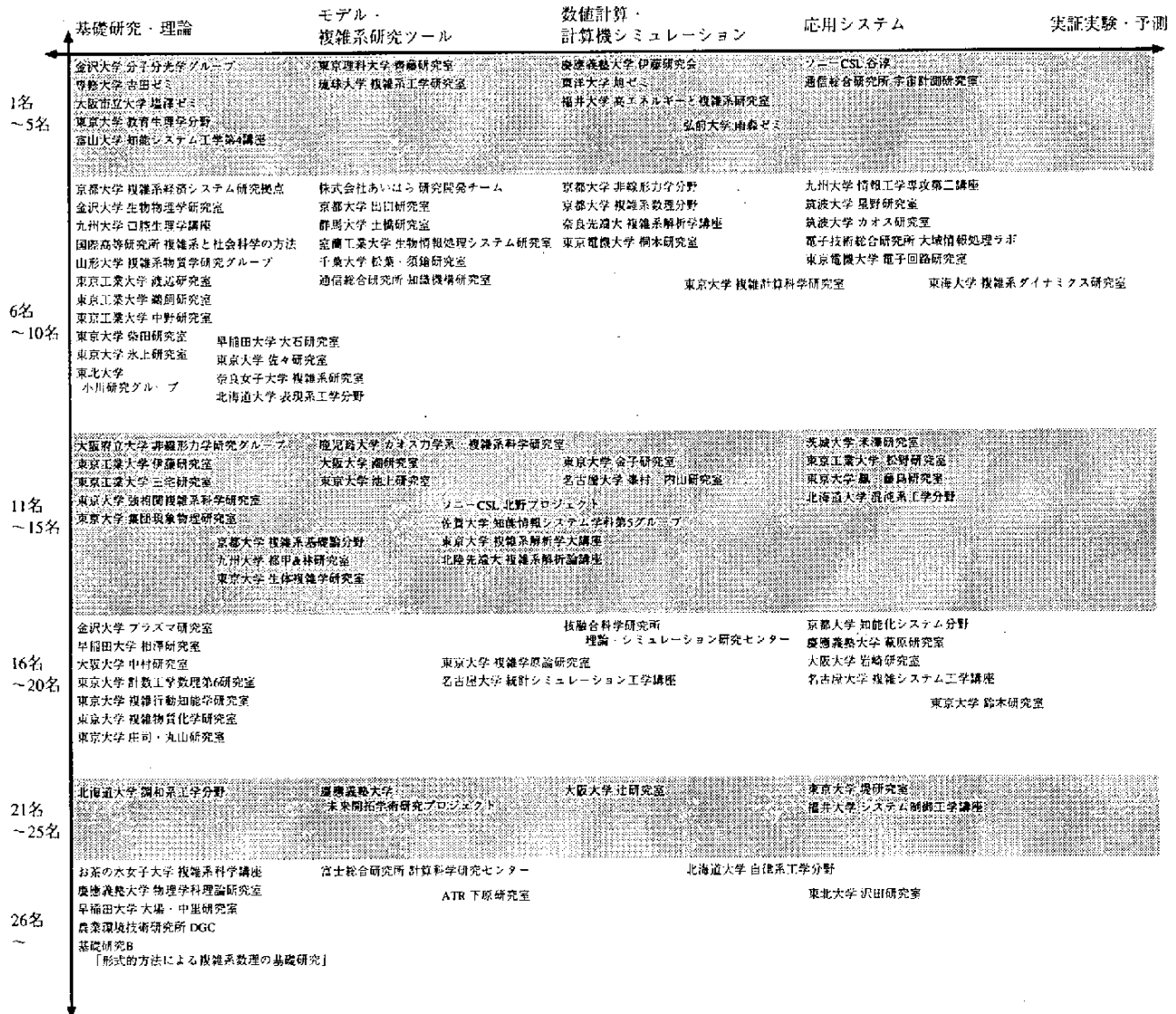


図 5.1-10 国内における複雑系研究の研究領域別マップ(2)

(3) 領域-規模別研究マップ

同じく領域に関する研究マップであるが、前節で示したものの縦軸を組織の規模として並べ替えた、研究領域-研究規模の2軸によるマップを示す。

第5.1.1項(4)(c)「研究規模」では、既存調査範囲を対象にして各研究組織の規模を集計した。ここではまず、最終的に収集した全ての項目を対象として、国内における複雑系研究組織の規模の分布を分析する。その結果を、表5.1-13に示す。

表5.1-13 研究規模ごとの集計(総合)

研究規模(人数)	度数
26名以上	11
21名～25名	5
16名～20名	15
11名～15名	21
6名～10名	31
5名以下	13
(うち1名	6)
不明	19

図5.1-10は、縦軸に組織規模の大小をとり、表5.1-13に基づいた分類によって各項目を配置した領域-規模別研究マップである。

5.2 欧米諸国における複雑系研究の実態調査

国内における複雑系研究実態調査に引き続き、欧米における複雑系研究の実態調査を、以下の手順で実施した。

前節で報告した国内の調査と同様、まず昨年度の調査結果を出発点とした。ただし、昨年度の調査では、欧米に関して十分な調査結果が得られておらず、それだけからマップの概要を構成するには不十分であった。そこで、研究マップの軸としては前節で構成したものを流用することとし、新たに調査を実施してその上に研究事例を配置することとした。

欧米の複雑系研究組織としては、主に米国 Santa Fe Institute と関連のある研究組織を中心として選抜し、調査を進めた。各項目は主としてその組織や研究者自身が公開しているホームページ、論文などの公開情報に基づいてまとめ、最終的に前節で作成した国内のマップと同様の複雑系研究マップを作成した。

5.2.1 既存調査の分析と追加調査

本節で報告する欧米諸国において実施されている複雑系研究の実態調査では、平成9年度「知的情報技術と利用の動向に関する調査研究報告書－複雑系情報処理に関する調査研究－」第3章「海外における複雑系研究の動向」の傾向を踏まえ、米国 Santa Fe Institute に関連のある研究者、研究組織を中心に実体調査を実施した。

(1) 既存調査項目

平成9年度の調査では、海外における複雑系研究の動向として、表5.2-1に挙げる研究組織(研究者)が実施する複雑系研究事例が紹介されている。現地視察を実施し、内容は非常に詳しく紹介されているが、組織数にして米国3件、欧州3件の計6件と、研究マップを作成するには項目数が絶対的に少ない。

(2) 追加調査手順

追加調査は、以下の手順で実施した。

1. 表5.2-1に挙げた項目に関し、現在の最新情報を調査し、必要に応じて情報を更新する。

2. さらに、米国 Santa Fe Institute (SFI)に関連した研究者、研究組織を調査する。

具体的には、SFIにおける招聘研究者(External Faculty)の所属先を、SFIの関連組織とする。

表 5.2-1 平成9年度報告における海外の複雑系研究組織・研究者

国	研究組織	研究者
米国	Stanford University	Stanley Peters
		David Beaver
	Xerox PARC	David Beaver
	Santa Fe Institute	Jim Crutchfield
		Chris Langton
		Barry McMullin
		Melanie Mitchel
イタリア	Consiglio Nazionale delle Ricerche	Walter Fontana
		Stefano Nolfi
スイス	Ecole Polytechnique	Dario Floreano
	F'ed'erale de Lausanne	Olivier Michel
フィンランド	Helsinki University of Technology	Heikki Koivo
		Heikki H"otyniemi
		Erkki Oja
		Juha Karhunen

これらの情報の調査に関しては国内での調査と同様に、各研究者や研究組織がWWWで公開している情報や論文など、公開情報に基づいて情報収集を行なった。また、関連研究組織の調査に関しては、対象となる招聘研究者の所属する組織だけでなく、それらの組織に関連した複雑系研究者や研究組織があればそれらも対象とするなど、幅広く調査を行なうことを心掛けた。

収集した情報は、国内での調査にならい、研究分野、研究領域、研究規模、代表的な研究者、組織名称、研究組織形態、研究概要、URL、キーワード、以上の項目に関して整理した。とくに、研究概要に関しては、ホームページなどで公開している情報を翻訳したうえで要約を行なった。

なお、Santa Fe Instituteにおける External Faculty のリストは、Santa Fe Instituteのウェブサイト中、次の URL で示されるページで公開されている。

<http://www.santafe.edu/sfi/organization/external-faculty.html>

(3) 調査結果

以上の手順で調査を実施し、次に挙げる項目に関して、欧米における複雑系研究の内容、研究組織の現状などの情報を収集した。

米国における複雑系研究組織

Adaptive Computation Group, Computer Science Department,
University of New Mexico
Autonomous Agents Research Group,
Electrical Engineering and Computer Science,
Case Western Reserve University
Biomathematics Graduate Program, Department of Statistics,
North Carolina State University
Bios Group, LP
Center for Complex Systems Research, Department of Physics,
University of Illinois at Urbana Champaign
Center for Nonlinear and Complex Systems, Duke University
Center on Social and Economic Dynamics, The Brookings Institution
Complex Systems Group, Theoretical Division,
Los Alamos National Laboratory
Complex Systems and Nonlinear Dynamics, Department of Physics,
University of Illinois at Urbana Champaign
Computational Semantics Laboratory,
Center for the Study of Language and Information, Stanford University
Computational and Applied Mathematics Program (CAMP),
University of Chicago
Department of Economics and the Graduate Field, Cornell University
Department of Economics, School of Humanities and Sciences,
Stanford University
Department of Economics, University of Wisconsin
Department of Mathematics, University of Wisconsin
Early Childhood Development, Vanderbilt University
Interdisciplinary Research Area (Complex Systems),
Department of Physics, University of Arizona
Internet Ecologies Area Project, Xerox PARC
Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology
Molecular Neurobiology Lab (MNL-S),
The Salk Institute for Biological Studies
NOBOTS Research Group, Stanford Robotics Laboratory,
Computer Science Department, Stanford University
Santa Fe Institute
Social and Decision Sciences Department, Carnegie Mellon University
Stanford Linguistics Department, Stanford University

The Brown Lab Group, Department of Biology, University of New Mexico
 The Feldman Lab, Department of Biological Sciences, Stanford University
 The Prediction Company
 The Program for the Study of Complex Systems,
 College of Literature, Science, and the Arts, University of Michigan
 Theoretical Astrophysics Group (T-6), Theoretical Division,
 Los Alamos National Laboratory
 Theoretical Biology and Biophysics Group (T-10), Theoretical Division,
 Los Alamos National Laboratory
 Theoretical Condensed Matter Physics, Physics Department,
 Princeton University

欧州における複雑系研究組織

Artificial Intelligence Group, Department of Computer Science,
 University of Manchester
 Artificial Life Laboratory, School of Electronic Engineering,
 Faculty of ENgineering and Design, Dublin City University
 Center for Neuro-Mimetic Systems (MANTRA),
 Computer Science Department (DI),
 'Ecole Polytechnique F'ed'erales de Lausanne
 Complex Systems Research Group,
 Department of Physics and Nuclear Engineering,
 Technical University of Catalonia
 Complex Systems Research Group, Physics and Engineering Physics,
 Chalmers University of Technology
 Control Engineering Laboratory,
 Department of Automation and Systems Technology,
 Helsinki University of Technology
 Department of Theoretical Biology / Bioinformatics Group,
 Utrecht University
 Division of Neural System and Artificial Life, Institute of Psychology,
 National Research Council
 Faculty of Life Sciences, Bar-Ilan University
 Independent Component Analysis (ICA) Research Group,
 Laboratory of Computer and Information Science,
 Helsinki University of Technology
 Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure
 Microprocessor and Interface Laboratory (LAMI),
 Computer Science Department (DI),

'Ecole Polytechnique F'ed'eraie de Lausanne
 Neural Networks Research Centre, Helsinki University of Technology
 Physics of Complex Systems Group, Niels Bohr Institute,
 University of Copenhagen
 Theoretical Biochemistry Group, Institute for Theoretical Chemistry,
 University of Vienna

5.2.2 欧米諸国の複雑系研究マップ

欧米諸国における複雑系研究の調査においては、SFIに関連した研究者を中心として複雑系研究を実施している組織の調査を行なった(第5.2.1項)。本項では、その結果を整理し、研究マップとして報告する。

なお欧米諸国で実施されている複雑系研究調査結果の一覧は、付録Bとして最後に添付する。

(1) 対象分野別研究マップ

第5.1節、第5.1.3項で報告した日本国内における複雑系研究マップに倣い、本項では欧米諸国における複雑系研究の調査結果に関して、まず研究対象の分野別の研究マップを作成した。

研究マップの軸と、マップへの配置の方法や基準は、全て第5.1.3項で述べたものに準じる。なお、欧米諸国に関して研究分野ごとの集計をとると、表5.2-2の通りとなった(度数2以下のものについては省略)。

表5.2-2 研究分野ごとの集計(欧米)

研究分野	度数	研究分野	度数
情報工学	21	物理学 数学	4
生物科学	19	生物科学 化学	4
物理学	12	情報工学 数学	4
経済学	11	社会学 経済学	4
生物科学 情報工学	9	社会学	4
数学	9	化学	4
物理学 生物科学	7	物理学 生物科学 数学	3
制御工学	7	物理学 情報工学 数学	3
物理学 情報工学	6	物理学 情報工学 経済学	3
生物科学 数学	5	物理学 経済学	3
制御工学 情報工学	5	生物科学 制御工学	3
物理学 生物科学 情報工学	4	情報工学 経済学	3

各複雑系関連研究者および研究組織を分野別マップに配置した結果を図5.2-1に示す。

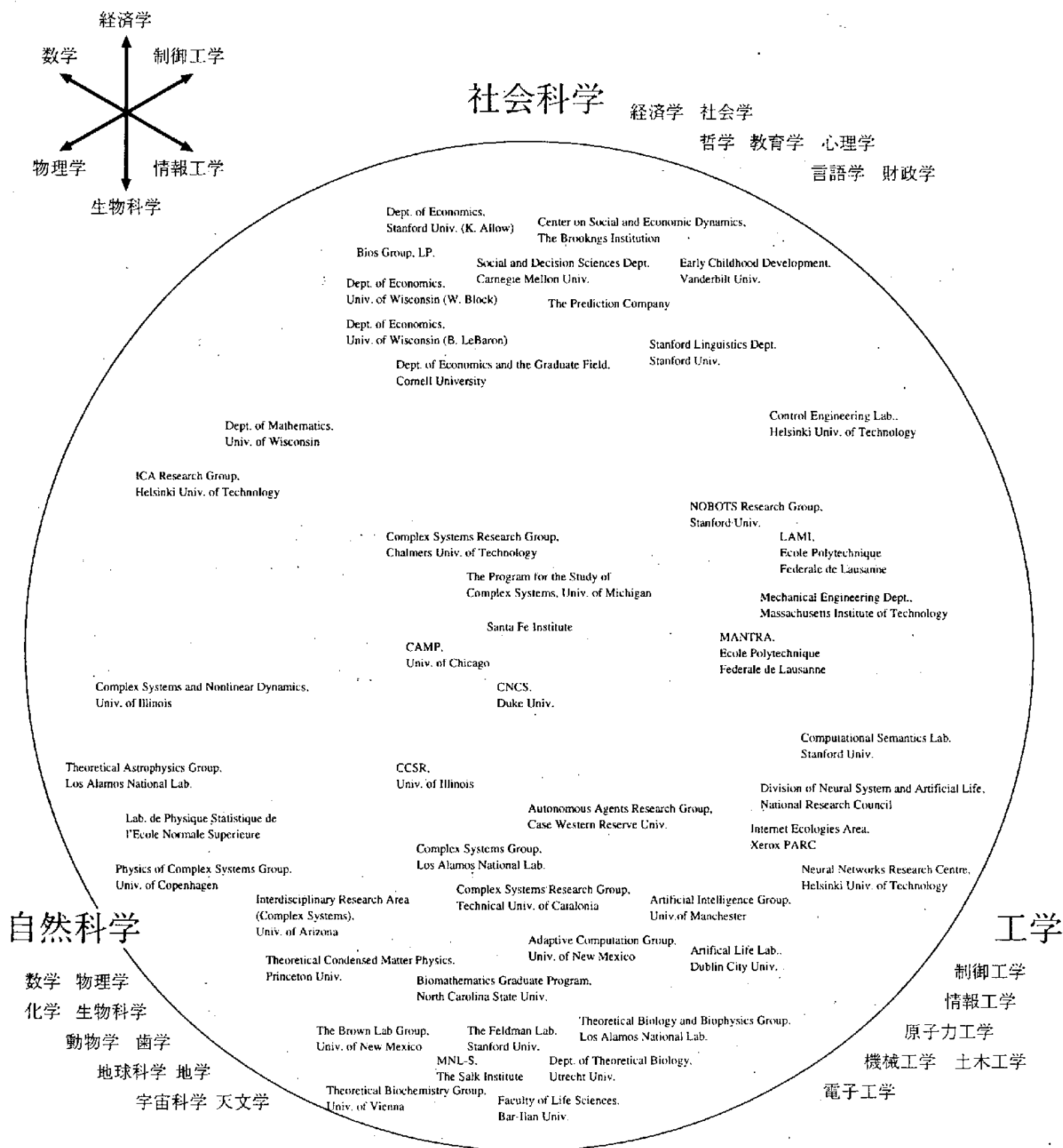


図5.2-1 欧米における複雑系研究の研究分野別マップ

(2) 領域-組織形態別研究マップ

今回収集した、欧米における複雑系研究に関する研究事例について、その研究の段階の分布を9段階で集計すると、表5.2-3および図5.2-2に示す通りとなった。

表5.2-3 研究領域ごとの集計(欧米)

研究領域	度数
基礎研究・理論	10
...	6
モデル・複雑系研究ツール	6
...	9
数値計算・計算機シミュレーション	2
...	4
応用システム	8
...	1
実証実験・予測	1

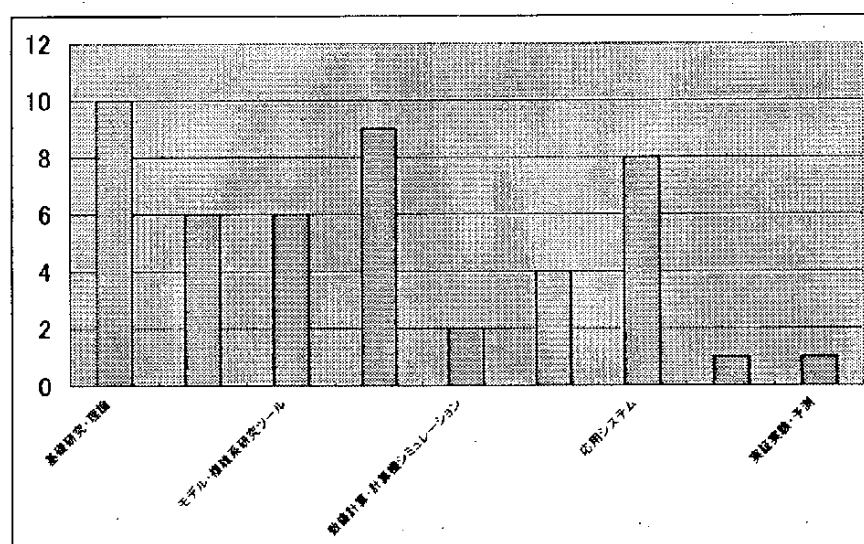


図5.2-2 研究領域(欧米)

上記の結果を、具体的な内容を明記して配置したマップを、次のページの図5.2-3に示す。国内における調査で作成したものと同様、大学での研究およびそれ以外のふたつに分類して提示した。

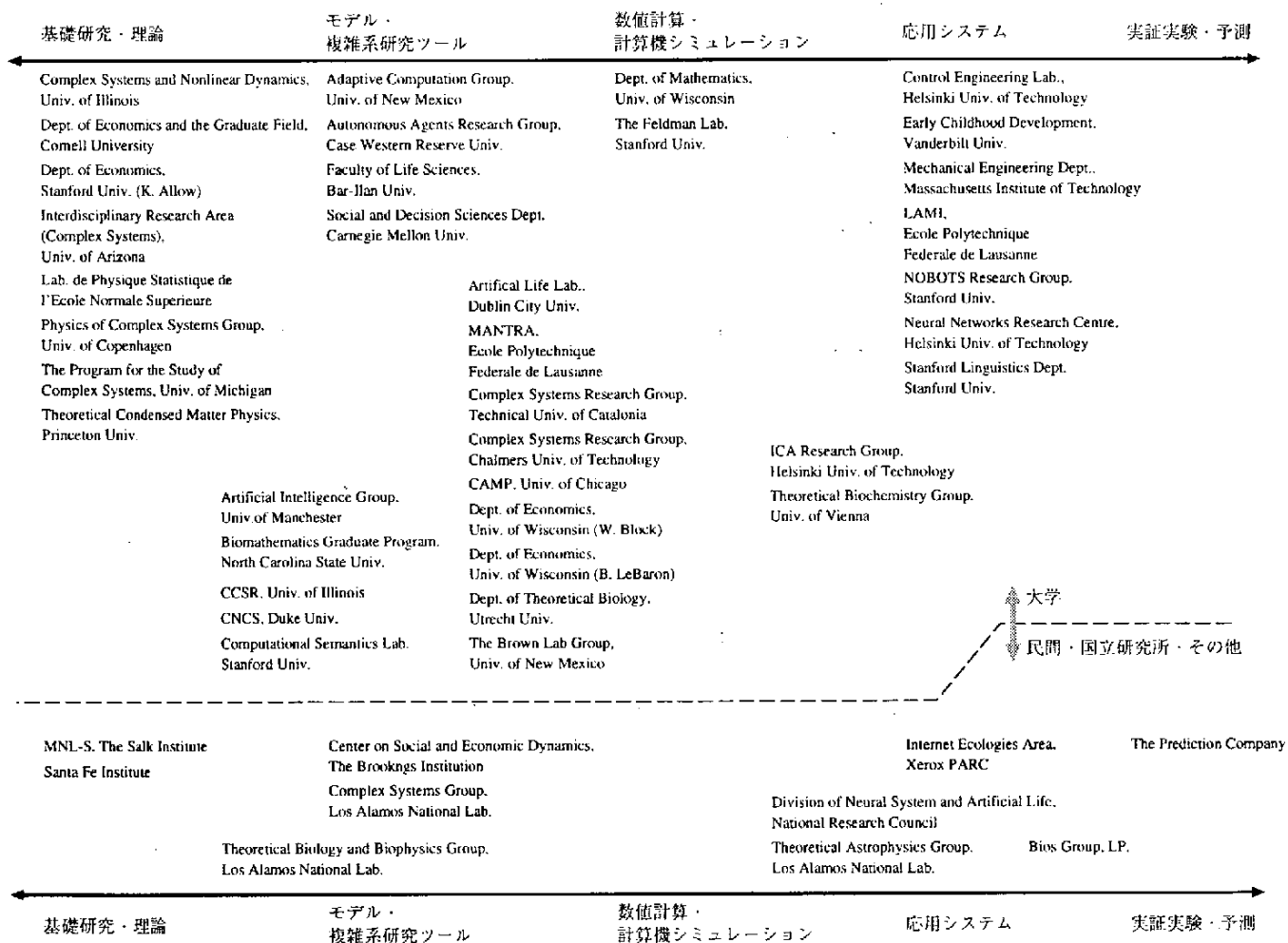


図 5.2-3 欧米における複雑系研究の研究領域別マップ(1)

(3) 領域-規模別研究マップ

国内の複雑系研究マップと同様、横軸を研究領域、縦軸を研究組織の規模とした研究マップも作成した。図5.2-4に、縦軸を組織規模とし表5.1-13と同様の分類によって各項目を配置した、領域-規模別研究マップを示す。

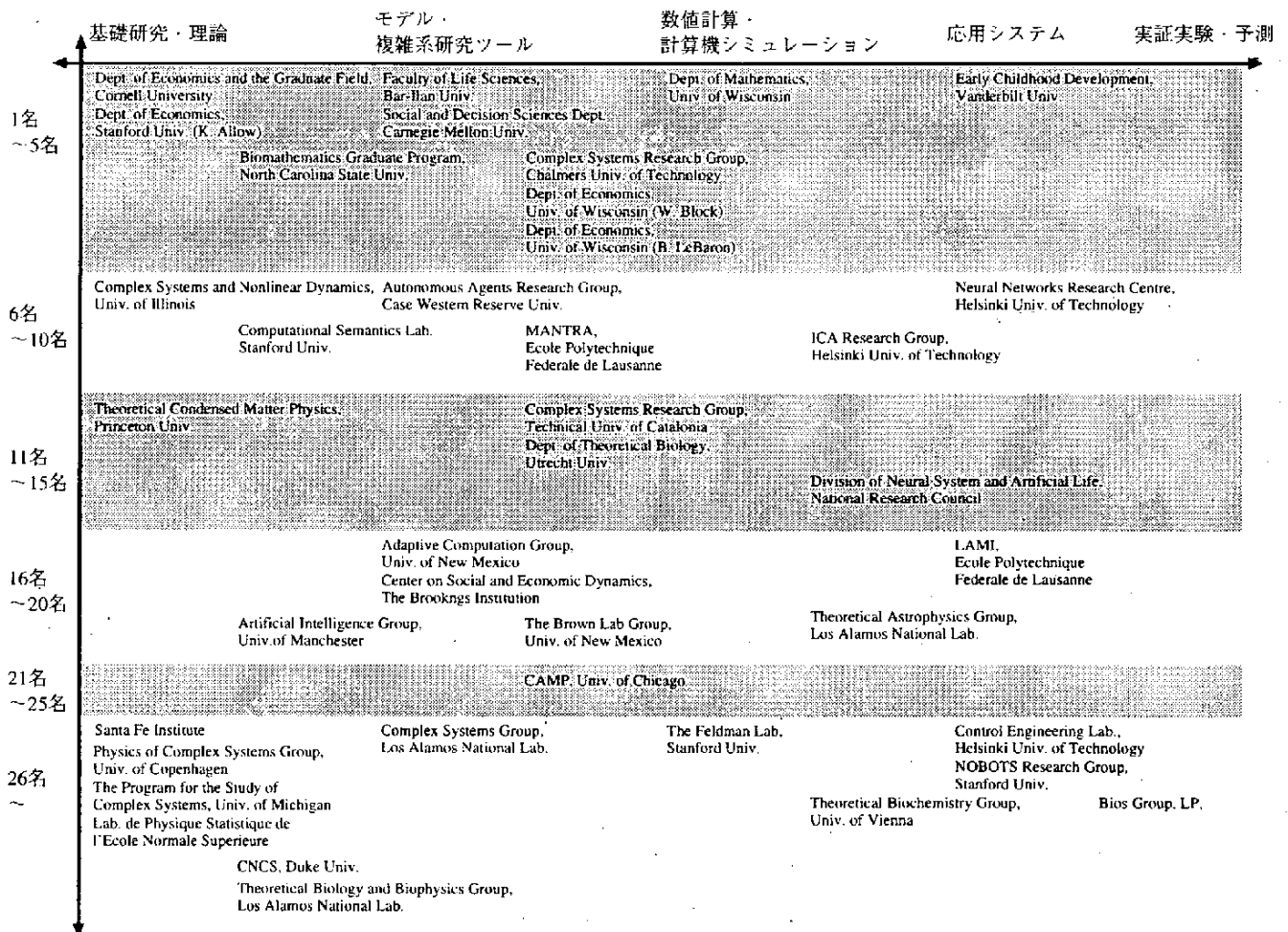


図5.2-4 欧米における複雑系研究の研究領域別マップ(2)

5.3 まとめ

本調査では、日本国内および欧米諸国における複雑系研究の実態を把握することを目的とし、複雑系に関連する研究を実施している研究者や研究組織を単位として研究事例を収集、分析を行なった。

第5.1節では、まず国内における複雑系研究の実態に関して調査を実施し、複雑系研究マップとしてまとめた結果を報告した。続く第5.2節では、欧米における複雑系研究の実態調査と複雑系研究マップの作成結果を報告した。本節では、各マップの特徴と傾向を分析し、複雑系研究の現状に関する考察を述べる。

5.3.1 研究内容の傾向に関する考察

研究分野の傾向

研究分野別マップの作成に関して、荒い分類の基準を自然科学、社会科学、工学の3分野とした。さらにその中で主要な研究分野として、物理学、数学、生物科学、情報工学、経済学、制御工学の6軸を考えた。これらの大きな3つの分野と、軸として選んだ6つの分野は厳密に対応するのではなく、したがって研究分野別マップにおける円は正確に3分割されるわけではない。実際、配置された個々の研究組織の研究分野を3つの分野に強引に分類するとしたら、社会科学に分類される項目は非常に少なくなってしまう。

第5.1節、第5.1.1項での分析では、既存調査範囲は自然科学系の研究センターのものであり経済や社会学を対象とした研究の調査が不十分であるとの結論を得ていた。そこでそれらの領域に関して重点的に調査を行なったが、現状として日本では、経済学や社会学などの分野における複雑系アプローチによる研究事例が、自然科学や工学の分野での複雑系研究の事例数に比べて非常に少ない。また、規模に関してもそれぞれ非常に小規模なものである(この事実に関しては後述する)。

欧米では、Santa Fe Instituteに代表されるように、経済・社会学から工学、物理学、数学、生物学、あるいは宇宙科学や環境学や心理学に到るまでの幅広い分野を対象とした研究組織や教育プログラムがいくつか存在する。研究分野別マップにおいては、円の中心に配置されている組織である。これらの組織の特徴は、組織自身が公開している案内の文章において"interdisciplinary"(=「学際的」)という単語が頻繁に用いられ、また事実その通りの様々な分野を横断した組織構成となっていることである。

一方日本でも、京都大学大学院の情報学研究科複雑系科学専攻や、平成10年4月に新たに設置された東京大学大学院新領域創成科学研究科の複雑理工学専攻など、複雑系に関する研究を手広く推進する組織がいくつか存在するが、いずれも工学・理学を中心とした組織であり、複雑系の守備範囲としては物足りなさが残る。

この不十分さを補おうと、未来工学研究所 CSC や、東京複雑系、複雑系仮想研究所

といった研究会や団体、メーリングリストや電子媒体を介在した仮想団体などがいくつか誕生している。これらの活動状況をみると、物理学や生物学、情報工学など理工学分野だけでなく、経済学、社会学などの研究者も、全体との割合からすれば少数ではあるものの、積極的に参加していることがわかる。

また、先の分析でも述べた通り、どの研究分野においても計算機を活用した研究が中心となっている場合が多く、複雑系研究において情報工学は主要な技術となることが研究マップからも見て取ることができる。マップ中、右下の情報工学関連に多くの研究組織が配置される傾向が、国内の複雑系研究マップ、欧米の複雑系研究マップの双方に現れている。また、脳や神経系のシミュレーション、あるいは免疫学や遺伝アルゴリズムなど生物科学と情報工学のリンクはとくに欧米における複雑系研究マップにおいて顕著である。

研究領域の傾向

領域別の研究マップに関しては、とくに日本のそれにおいて、基礎研究・理論に分類される研究組織が非常に多いことが目を惹く。複雑系研究の特徴のひとつに計算機を用いたモデル化やシミュレーションによる解析を挙げることができるので、基礎研究が多いのはやや意外にみえるかもしれない。これらは、やはり大学での研究事例が圧倒的に多いためであって、日本での研究マップ、欧米での研究マップ共に、大学以外の研究組織に着目すると、基礎研究の割合は下がり、逆に基礎研究以外の占める割合が高くなる。

なお、欧米における研究組織の対象が基礎から応用まで比較的幅広く広がっている原因のひとつとしては、欧米の複雑系研究組織の選択基準として Santa Fe Institute と関連のある研究者の繋がりを利用したことが考えられる。今回の調査において Santa Fe Institute 自身は基礎研究を行なっている組織として分類したが、実態としては基礎研究だけでなくかなり広範囲にわたって研究を行なっている。実際に、数値計算やシミュレーション、応用に関する研究や教育も盛んに行なわれている。したがって、関連する研究者も複雑系研究の枠組みのなかで様々な分野、領域をカバーしており、結果として広く網羅的な調査を行なうことができた、との理由からである。

5.3.2 組織形態・規模に関する考察

研究組織形態の傾向

領域-組織形態別の研究マップを見て明らかに分かるように、日本および欧米諸国共に、複雑系研究の中心は大学の研究室である。やはり、学問としてまだ黎明期であることや、応用の可能性が模索中であることなどにより、民間での研究例は少ない。ただし、日本でもソニーコンピュータサイエンス研究所の例のように、複雑系関連研究

を推進することを対外的に発表している組織もあり、複雑系研究の進展に伴い、今後、企業など大学以外の研究組織でも積極的に複雑系研究を実施する研究組織や研究者が増えてくる可能性もある。

今回の調査では、公開情報に基づいて調査を実施したため大学以外の情報収集が難しかったことは事実である。しかし、例えば情報処理学会「知能と複雑系研究会」の過去の発表プログラムを参照すると、今回収集したデータとほぼ同程度の割合で大学からの参加者が占めている。このことから判断して、今回のデータに関する組織形態の傾向はほぼ妥当なものであろう。

研究規模の傾向

経済学、社会学など社会科学系の複雑系研究は個人単位で行なわれることが多く、物理学や情報工学などの理工学分野、あるいは工学への応用などを中心に研究している複雑系研究では、組織単位で大掛かりに研究が実施されていることが多いという明確な傾向が認められた。複雑系だけでなく一般的に、人文・社会科学と比較して理工系の研究室では研究室単位で研究を遂行するケースが多い。さらに、プラズマ実験系、原子核物理学などのように大規模な実験装置を必要とするものや、ロボットへの応用など各種の装置を使用する研究においては物理的に人数を要求するなどの制約もある。

これらの理由により、経済学における複雑系研究などはどうしても小規模なものになりがちであるが、例えば日本においては国際高等研究所の「複雑系と社会科学の方法」プロジェクト、あるいは欧米においては Santa Fe Institute の Economics Program など、各研究者が所属を越えたプロジェクトを組織して研究にあたっている例も存在する。

資料 A 複雑系研究一覧（国内編）

第 5.1 節で調査した日本国内における複雑系研究事例の一覧

ATR人間情報通信研究所 下原勝憲研究室	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	28名
代表的な研究者	下原 勝憲
研究概要	ソフトウェア/ハードウェアの進化、振舞いの進化と適応的行動、進化的システムの応用、非線形情報処理モデルなどを研究している。具体的なテーマは、セルラーオートマタ、社会心理学からのアナロジーに基づくグループ構造のモデル、ファジイ推論による個々の行動の学習則、進化的ネットワークゲームの開発、先進的知的システムのためのソフトコンピューティングフレームワーク、楽器と音響生成機器のシミュレーション、ニューラルネットワークアプリケーションの最適化、など。
キーワード	

出典: <http://www.hip.atr.co.jp/departments/dept6.html>

お茶の水女子大学 大学院 人間文化研究科(博士後期課程) 複合領域科学専攻 複雑系科学講座	
研究分野	物理学、化学、生物科学、地球科学、宇宙科学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	44名
代表的な研究者	藤枝 修子、太田 隆夫、益田 祐一、細矢 治夫、今野 美智子、今井 正幸、最上 善広
研究概要	複雑系が内包する相互作用による自己組織化の視点から、自然界に存在する秩序相の生成や、社会組織の生成と崩壊、生命現象に見いだされる自己最適化と応答可塑性、意識の本質と創造性の問題などを、学際的に研究する。とくに、数理的な視点を基礎とした統合的な方法論によって研究を行なう。
キーワード	

出典: <http://www.ocha.ac.jp/~gradu/fukugo.html#chem>

システム総合研究所 複雑系工学研究会	
研究分野	情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	—
代表的な研究者	合原 一幸、潮 俊光、堀尾 喜彦、中森 義輝
研究概要	本研究会では、これまで工学者、エンジニアが線形理論と現実の隔たりに悩みつつ、現実問題として無意識ながら複雑系を取り扱ってきたことに着目している。これまでのカオス工学研究実績をベースに、複雑系の基礎理論の構築と産業応用の基礎技術の確立を目指して複雑系工学の基礎と応用に関する研究を進めている。
キーワード	

出典: <http://www.jisr.or.jp/sfukuzatu.htm>

ソニーコンピュータサイエンス研究所	
研究分野	情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	1名
代表的な研究者	谷 淳
研究概要	自律システムを設計する際の重要な指針にすることを目標として、自律、適応といった概念自身の複雑さに基づく分類の可能性を追求する。そのために、力学系の相転移の枠組みを適用することを検討している。現在は、未知空間を探索する自律ロボットの行動学習の実験を行ない、条件反射に基づく行動から計画に基づく行動へと遷移する過程における知能が発現しだす臨界点の構造について研究中である。
キーワード	

出典: <http://www.csl.sony.co.jp/person/tani.j.html>

ソニーコンピュータサイエンス研究所 北野共生システムプロジェクト	
研究分野	生物科学、制御工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	15名程度
代表的な研究者	北野宏明
研究概要	様々な要素が、単に関連するだけでなく選択的な相互作用を行なうような系を共生系として考える。生命現象を広義の共生系と捉え、遺伝子発現の調節、代謝、神経回路網の形成等に対しシステム工学としての解析を加えること、および研究を通じて得られる新たな知見を工学的に応用する新概念の提唱を目指している。具体的には、各段階におけるシミュレーションモデルを分析することによって仮説を構築する一方で、実際の生物実験による検証も行なう。
キーワード	

出典: <http://www2.jst.go.jp/erato/announce/19980812/outline2.html>

茨城大学 工学部 システム工学科 複雑適応システム研究室(米澤研究室)	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	13名
代表的な研究者	米澤 保雄、岩崎 唯史
研究概要	複雑な情報システムの構築を実在の複雑情報システムである生物をモデルとして研究を行なっている。自然情報科学の観点から、コンピュータ情報、物質情報、生命情報に跨る学際的な研究体制をとり、「情報システム論に根ざす理論的」及び「実験的実証主義的」方法論の双方から研究を進めている。研究内容は、遺伝情報システム、人工脳の情報処理モデル、群知能情報処理システム、内分泌情報システム、免疫情報システム、細胞型駆動機構の研究、液晶DNAによる超並列処理、セルフアッセンブリーマイクロシステム、生体複雑構造解析、植物ゲノム情報解析、など。
キーワード	遺伝情報システム、人工脳の情報処理モデル、群知能情報処理システム、内分泌情報システム、免疫情報システム

出典: <http://life07.dse.ibaraki.ac.jp/>

株式会社あいはら 研究開発チーム	
研究分野	数学、情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	—
代表的な研究者	山田 泰司、高橋 純
研究概要	カオス、非線形工学に関する研究を行なっている。非線形工学技術の基礎解析ツールとして、カオス時系列解析ソフトChaosTimesを開発し、それに関する新しい技術の研究開発も行なっている。
キーワード	

出典: <http://localweb.aihara.co.jp/rdteam/index-j.html>

京都大学 経済学部 出口研究室	
研究分野	経済学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	約10名
代表的な研究者	出口 弘
研究概要	人工経済プロジェクト、社会的マルチエージェント意味論、情報指向社会プロジェクト、などの研究プロジェクトを実施し、経済に関する複雑系について研究している。
キーワード	

出典: <http://degulab.econ.kyoto-u.ac.jp/degulab.html>

京都大学 経済研究所 経済計画研究部門 複雑系経済システム研究拠点	
研究分野	経済学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	7名
代表的な研究者	西村 和雄、新後 閑禎、藤田 昌久、森 知也
研究概要	文部省のCOEプログラムの1つとして設定された「複雑性と非線形経済システム:理論と応用」プログラムを実施している。
キーワード	

出典: <http://www.kier.kyoto-u.ac.jp/cces.html>

京都大学 大学院 情報学研究科 複雑系科学専攻 応用解析学講座 逆問題解析分野	
研究分野	数学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	—
代表的な研究者	木上 淳、磯 祐介、久保 雅義、若野 功
研究概要	工学・物理の現象を記述する偏微分方程式に対する境界値問題などの順問題、および、それらの方程式に含まれる未知係数を観測データから決定するタイプの逆問題に対し、数学解析と数値解析の両面から研究している。また、特に弾性体の破壊問題に関する微分方程式の数値解析と数学解析の研究を中心として行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.acs.i.kyoto-u.ac.jp/subject.html>

京都大学 大学院 情報学研究科 複雑系科学専攻 応用解析学講座 非線形解析分野	
研究分野	数学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	—
代表的な研究者	西田 孝明、熊谷 隆、日野 正訓
研究概要	確率論の手法を用い、自己相似性を持つ図形の上の解析学を展開している。さらに、ランダムな媒質等の上の物理現象の確率モデル的解析、ランダムな現象を記述する際に用いられる標本空間の無限次元的な側面に焦点を当てた研究なども行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.acs.i.kyoto-u.ac.jp/subject.html>

京都大学 大学院 情報学研究科 複雑系科学専攻 複雑系構成論講座 知能化システム分野	
研究分野	制御工学
研究領域	応用システム
研究規模	17名
代表的な研究者	山本 裕、藤岡 久也、若佐 裕治
研究概要	我々を取り囲むあらゆるシステムを高度に制御することを目標に研究を行なっている。具体的には、デジタル制御、ロバスト制御、学習/CADシステム、信号処理系、ニューラルネットワークなどに対して、高度な制御と知能化、自己組織化の原理と応用の研究を進めている。
キーワード	

出典: <http://wiener.kuamp.kyoto-u.ac.jp/>

京都大学 大学院 情報学研究科 複雑系科学専攻 複雑系構成論講座 複雑系基礎論分野	
研究分野	数学、情報工学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	13名
代表的な研究者	野木 達夫、原田 健自
研究概要	複雑系の数学モデル、計算モデル、解法アルゴリズムについての数理工学研究基盤として、並列的相互作用の複雑さ、自己組織化、大局的把握などの解明を目指している。また、複雑系を再現するための並列計算機や、計算を援用するための自動並列化コンパイラ環境、知識データベースに自己増殖学習機能を組み込んだ問題解決型ソフトウェアの開発を進めている。
キーワード	

出典: <http://www-fcs.acs.i.kyoto-u.ac.jp/>

京都大学 大学院 情報学研究科 複雑系科学専攻 複雑系力学講座 非線形力学分野	
研究分野	数学、物理学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	10名
代表的な研究者	船越 満明、田中 泰明、金子 豊
研究概要	流体系、多粒子系、構造システムなどの非線形力学系の示す複雑な挙動の解明およびその制御を目指している。とくに、流体系や結合力学系に現れるカオス、パターン形成、波動、渦の相互作用などの非線形挙動を、非線形力学の理論、縮約理論、ソリトン理論などを基礎とした計算機シミュレーションを用いて解明する研究を行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.kuamp.kyoto-u.ac.jp/labs/mec/hisenkei/main.html>

京都大学 大学院 情報学研究科 複雑系科学専攻 複雑系力学講座 複雑系数理分野	
研究分野	数学、物理学、化学、生物科学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	10名
代表的な研究者	藤坂 博一、宮崎 修次、筒 広樹
研究概要	流体、結合電子回路、化学反応、液晶、磁性体、生物系などを対象として、計算機援用による研究を行なっている。これらの、空間自由度など大きな自由度を持つ非線形系の複雑系にみられる多様な構造の形成と運動発現の共通原理とそれらの特性の数理法則を明らかにすることを目指している。
キーワード	

出典: <http://wwwfs.acs.i.kyoto-u.ac.jp/>

金沢大学 理学部 物理学科 複雑系物理学講座 プラズマ研究室	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	16名
代表的な研究者	増崎 克、鎌田 啓一、安藤 利得
研究概要	100万ボルト3万アンペア級の大出力電子ビーム発生装置を持ち、下記のテーマに関する実験的な研究を行なっている。強いラングミュア乱流、サイクロトロン・チェレンコフレーザー、プラズマ封入チェレンコフレーザー、自動加速、自動変調、などを研究テーマとして、電子ビームとプラズマの相互作用、電子ビームからの大出力電磁波発生、電子ビーム自身の変調や加速に関わる物理現象を研究している。
キーワード	

出典: http://nature.s.kanazawa-u.ac.jp/physics_MC/plasma/index.html

金沢大学 理学部 物理学科 複雑系物理学講座 生物物理学研究室	
研究分野	生物科学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	10名
代表的な研究者	安藤 敏夫
研究概要	生体運動を担う、モーター蛋白質と呼ばれる蛋白質に関して、構造学的アプローチおよび現象論的アプローチからそのメカニズムの解明を目標として研究を行なっている。そのための蛋白質1分子を操作・観察・計測する実験的手法による解析とそのための実験手法の開発も主要な研究テーマである。
キーワード	

出典: http://nature.s.kanazawa-u.ac.jp/physics_MC/biophys.html

金沢大学 理学部 物理学科 複雑系物理学講座 分子分光光学グループ	
研究分野	物理学、化学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	5名
代表的な研究者	大橋 信喜美、藤竹 正晴
研究概要	分子の回転エネルギー順位構造に着目した高分解能分光法を基礎として、近赤外ダイオードレーザー分光法による短寿命分子の高分解能スペクトルの実験的研究、分子内大振幅振動を有する分子の高分解能スペクトルの理論的研究、の2つを柱に研究を行なっている。この研究を通じ、分子スペクトルの測定と解析による分子の構造・性質と運動の様子を明らかにすることを目的としている。
キーワード	

出典: http://nature.s.kanazawa-u.ac.jp/physics_MC/bunshi.html

九州大学 歯学部 口腔生理学講座	
研究分野	歯学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	7名
代表的な研究者	太田 雅博、笹本 一茂、三島 和夫、石塚 智
研究概要	口腔生理学の対象とする口腔機能のうち、主に咀嚼運動に焦点を当て、咀嚼運動の神経系の原理に関する研究を行なっている。研究内容は、咀嚼リズム顎運動を起こすニューロン機序、顎運動制御における大脳基底核の役割、視床皮質反響回路の電気活動の麻酔深度による変化、神経系の非線型応答とカオス、など。
キーワード	

出典: <http://www.dent.kyushu-u.ac.jp/dent/dec/>

九州大学 大学院 総合理工学研究科 大樹海洋研究システム学専攻 流体環境学大講座 複雑系物理学研究室	
研究分野	物理学、宇宙科学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	—
代表的な研究者	太田 正之輔、羽田 亨
研究概要	熱力学的な意味における非平衡状態において生じる様々な形態、散逸構造について、主に温度場、濃度場、流体の速度場、静電ポテンシャルなどの拡散場を対象としてこれらの形態と一般的な性質を実験および計算機シミュレーションによって研究している。また、プラズマ物性の理解を通して、宇宙空間および天体中にみられる様々な高エネルギー非線形現象の研究を、数値計算と計算機シミュレーションを利用して行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.esst.kyushu-u.ac.jp/>

九州大学 大学院 システム情報科学研究科 情報工学専攻 情報工学専攻第二講座	
研究分野	情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	10名
代表的な研究者	香田 徹、大濱 靖匡、藤崎 礼志
研究概要	SS技術を用いたCDMA方式による「電子透かし」、画像の可逆圧縮伝送実験、確率論的シミュレーションに基づくDES暗号の解読実験、耳音響放射に関する蝸牛モデル、などの情報通信、情報理論に関する研究を行なっている。また、これらに関わる課題として、カオスを用いた2値乱数生成法、カオス乱数のランダム性や独立性の評価、カオスによるストリーム暗号などの研究も実施している。
キーワード	カオス、スペクトル拡散通信、暗号通信、擬似乱数、聴覚末梢系の情報処理過程

出典: <http://www-kairo.csce.kyushu-u.ac.jp/kohda-lab/homepage.ja.html>

九州大学 大学院 システム情報科学研究科 電子デバイス工学専攻 電子機能材料工学講座 都甲&林研究室	
研究分野	生物科学、電子工学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	14名
代表的な研究者	都甲 潔、林 健司、吉川 由紀子
研究概要	マルチチャネル膜電位計測型味覚センサ、味の計測、センサ応答メカニズム、近赤外分光分析法など味覚センサに関する研究や、結合振動子系、カオス、相転移、情報処理、統計ニューロダイナミクスなどのニューラルネット関連、植物の成長と電気現象、興奮性人工膜における非線形・非平衡現象といった自己組織化に関する研究を行なっている。
キーワード	結合振動子系

出典: <http://ultrabio.ed.kyushu-u.ac.jp/index.html>

群馬大学 工学部 生物化学工学科 生物機能工学講座 生物機能第一 土橋研究室	
研究分野	化学、生物科学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	8名
代表的な研究者	土橋 敏明
研究概要	高分子物性の立場から、多成分系に特徴的にみられる多様な現象を調べている。研究対象は、合成高分子溶液、界面活性剤水溶液、細胞を含むマイクロカプセル懸濁液、生体高分子溶液など。現在の中心テーマは、高分子溶液の相平衡、マイクロカプセルの構造と物性、生体物質の熱力学的性質、であり、これらに関してモデルを用いた解析と実験による研究を行なっている。
キーワード	

出典: <http://dobashilab.bce.gunma-u.ac.jp/>

慶應義塾大学 経済学部 伊藤研究会	
研究分野	経済学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	1名
代表的な研究者	伊藤 幹夫
研究概要	経済における非線形性が時間空間的に均質でないパターンを生成する原理およびその原理の現実妥当性を計測する技術について調べている。とくに、経済単位の間局所的な相互依存関係とそれに関する非線形性について、シミュレーションなどによって特性をテストする方法を探っている。
キーワード	

出典: <http://seminar.econ.keio.ac.jp/itosemi/index-j.html>

慶應義塾大学 理工学部 情報工学科 萩原研究室	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	19名
代表的な研究者	萩原 将文
研究概要	人間の脳の情報処理機能と、進化のメカニズムをそれぞれ工学的に実現するといった2つのアプローチで、新しい知的情報処理方式の構築を目指した研究を行なっている。ニューラルネットワーク、ファジィ、脳の学習機能解明、ニューラルネットワーク応用、進化CG、知識処理、遺伝的アルゴリズム、人工生命、ヒューマンインタフェース、感性工学、などのテーマで研究を進めている。
キーワード	

出典: <http://www.soft.ics.keio.ac.jp/>

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 理論研究室	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	約30名
代表的な研究者	川村 清、齋藤 幸夫、日向 裕幸、福田 禮次郎、米沢 富美子、高野 宏、能勢 修一、江藤 幹雄、古池 達彦
研究概要	研究テーマは、非平衡系・ランダム系の統計物理学、固体中の素励起の量子物理学、結晶成長の理論、相転移理論、分子動力学、複雑系、一般相対論・重力理論、など。
キーワード	

出典: <http://www.phys.keio.ac.jp/lab/riron/index-jp.html>

慶應義塾大学 理工学部 未来開拓学術研究プロジェクト 複雑系物理モデルによる生命情報システムの研究	
研究分野	物理学、生物科学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	21名
代表的な研究者	川村 清
研究概要	仮想モデルに基づく複雑系の物理学と、生命情報の伝播と処理に関する現象論的モデルを融合し、新たな複雑系の物理学を確立することを目的としている。さらには、複雑系の物理学の基本法則の確立と、その研究成果の生命科学へのフィードバック、さらには理工学だけでなく社会への貢献をも目的とする。
キーワード	

出典: <http://fs.future.st.keio.ac.jp/bio/index.html>

経営情報学会 「主体を含む複雑系」研究グループ(CoSDeM)	
研究分野	経済学、社会学、情報工学
研究領域	—
研究規模	—
代表的な研究者	木嶋 恭一、高橋 真吾、出口 弘、佐藤 亮、根来 龍之、遠藤 清三
研究概要	カオスやニューラルネットといった狭義の複雑系に捕らわれることなく、「一つの原因やモデルですべてを解明できない」系としての複雑系を研究するグループである。複雑系には内部に自由な意思を行使できる「主体」が存在することを重要視し、研究グループ名称を「主体を含む複雑系」に決定した。
キーワード	

出典: <http://www02.so-net.ne.jp/~negoro/sysmethod/cosdem.html>

弘前大学 理工学部 情報科学科 情報認識論講座 雨森ゼミナール	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション、応用システム
研究規模	4名
代表的な研究者	雨森 道紘
研究概要	ニューラルネットワークと資格情報処理をテーマに、脳の情報処理および神経細胞モデル理解し、ソフトウェアや情報工学におけるロボティクスなど応用を目的とした研究を行なっている。応用研究としては、ニューラルネットワークによる情報認識・画像認識、生体情報処理機能のシミュレーション、最適化問題、気象予測、カオス、ファジイ、人工知能、などを研究している。
キーワード	

出典: <http://sci.hirosaki-u.ac.jp/~ninsiki/index-j.html>

国際高等研究所 「複雑系と社会科学の方法」プロジェクト	
研究分野	経済学、哲学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	9名
代表的な研究者	塩沢 由典
研究概要	社会科学の分野に限定した複雑系研究プロジェクトである。複雑系が社会科学の方法や哲学にもたらす新しい考え方を、総合的かつ鋭角的に探ることを目指している。具体的な課題は、複雑さへの再認識による社会科学の批判・反省、複雑さを考慮に入れた社会科学の研究プログラム、科学観の変革、の3つである。
キーワード	

出典: <http://www.iiias.or.jp/fukuzatsu.html>

佐賀大学 理工学部 知能情報システム学科 第5研究グループ	
研究分野	情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	11名
代表的な研究者	近藤 弘樹、只木 進一、岡崎 泰久
研究概要	複雑系研究は、只木助教授によるグループが中心となって実施している。シミュレーションと理論を通じ、自然・社会における複雑な系の研究を行なっている。最近のトピックは、神経回路、セルオートマトン、交通流モデル、伝染病モデルなど。
キーワード	

出典: <http://www.is.saga-u.ac.jp/ai/ai.j.html>

山形大学 理学部 物質生命科学科 複雑系物質学研究グループ	
研究分野	化学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	6名
代表的な研究者	植村 治、亀田 恭男、臼杵 毅
研究概要	電氣的、磁氣的、光學的性質の測定や回折実験により、非結晶物質としての複雑系に特有な性質の原因を探っている。溶液中におけるイオンの溶媒和構造、合金を構成する元素の種類や結合性と電氣的性質の関係、ガラス構造と物性との関係などの研究を行っている。
キーワード	金属-非金属転移融体、複雑溶液の構造、高伝導性ガラス

出典: <http://www-sci.yamagata-u.ac.jp/~usuki/>

鹿児島大学 理学部 物理科学科 物性理論大講座 カオス力学系・複雑系科学研究室	
研究分野	物理学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	12名
代表的な研究者	井上 政義、秦 浩起
研究概要	旋律的和音エントロピーによる音楽の解析、結合写像系におけるカオスの遍歴、結合系の同調状態と臨界現象、マルチエージェントシステム、生命の進化、といったテーマで、カオス力学・複雑系の科学に関する研究を行なっている。
キーワード	旋律的和音エントロピー、Hogg-Hubermanモデル

出典: <http://phys.sci.kagoshima-u.ac.jp/hata/chaos-new.html>

室蘭工業大学 工学部 情報工学科 生物情報処理システム研究室	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	9名
代表的な研究者	長島 知正、徳田 功
研究概要	生物システムの情報処理機構を理解し、生物情報処理システムの計算機科学技術への応用を目指した研究を行なっている。研究例は、脳神経系の情報処理モデルとしてのカオスニューラルネットワークの構築、音楽情報処理、遺伝情報(ゲノム情報)の解読のための計算アルゴリズムとしてのコンセンサスパターンの高精度抽出手法並びに塩基配列の相同性検出技術の開発、など。
キーワード	

出典: <http://may.csse.muroran-it.ac.jp/index-j.html>

情報処理学会「知能と複雑系（ICS）」研究会	
研究分野	情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	—
代表的な研究者	橋田 浩一、有馬 淳、長尾 確、山田 誠二
研究概要	複雑な社会システムの挙動を複数のエージェントの並列動作によってシミュレートしようとする複雑系のアプローチと、エージェントの相互作用によって創発的知識を実現しようとする最近のAIの動向との関連性に着目し、人工知能研究と複雑系研究の相互作用の追求を目指した研究会である。知識表現、推論、学習、対話、複雑系の情報処理、人工社会、分散協調処理、自己組織化、自己言及システム、人工生命、などのテーマで研究会を開催予定。
キーワード	

出典: <http://www.ymd.dis.titech.ac.jp/sig-ics/>

進化経済学会 非線形問題研究部会	
研究分野	経済学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	—
代表的な研究者	有賀 裕二、浅田 統一郎、吉田 雅明、小田 宗兵衛
研究概要	進化ゲームモデル、非線形動学モデル、変異淘汰モデル、複雑系モデルなどに基づく進化経済学の発展を目標とし、各モデルの相互関連性や類似性に留意しつつ、進化経済学が対象とする各種の主題を「多様な非線形モデル」をつうじて照合、さらに「非線形性応用」のための巧妙な技術を開発して行くことを目的とする。
キーワード	

出典: <http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/~evoeco/sect-nonl.html>

千葉大学 工学部 情報画像工学科 情報工学コース 基礎情報工学講座 数理情報工学教育研究分野 松葉・須鎗研究室	
研究分野	情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	8名
代表的な研究者	松葉 育雄、須鎗 弘樹
研究概要	下記の研究テーマでカオス、フラクタル等の研究を行なっている。 ・多層ニューラルネットワークの記憶容量、汎化能力の解析 ・眼優位性コラムなど視覚系に関するモデリング ・カオスの普遍性に関する数理研究 ・気温データ、時系列解析データのカオス解析 ・脳波の特徴解析 ・経済時系列データのカオス的予測法の研究 ・地震断層のフラクタル解析とモデリング ・量子コンピュータ上のアルゴリズム開発
キーワード	

出典: <http://imws2.tg.chiba-u.ac.jp/>

専修大学 経済学部 近代経済学(原論) 吉田ゼミ	
研究分野	経済学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	1名
代表的な研究者	吉田 雅明
研究概要	単なるシミュレーションでない、セルオートマトン力学系の理論と社会問題への適用手順、実行可能性理論(viability theory)についてなどを研究。
キーワード	

出典: http://www.senshu-u.ac.jp/~the0350/ehp/1998/professor/e_yom98.htm

早稲田大学 理工学部 応用物理学科 相澤研究室	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	18名
代表的な研究者	相澤 洋二、龍野 正実
研究概要	非線形非平衡系の統計力学を研究している。エルゴード問題、散逸構造、カオス、フラクタル、パターン形成などの基礎問題が中心である。具体的には、力学が産み出す多様なカオス現象、凝縮系・反応拡散系・流体系・プラズマ系などの平行から遠く離れた状態に広く観測されている秩序パターン・乱流パターン・フラクタルパターンの発生機構、生物系にみられる非線形非平衡系現象の理論的研究、など。
キーワード	

出典: <http://www.phys.waseda.ac.jp/aizawa/index-j.html>

早稲田大学 理工学部 情報学科 大石研究室	
研究分野	情報工学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	9名
代表的な研究者	大石 進一、神沢 雄智
研究概要	制度保証数値計算に基づく計算機援用非線形解析に関する課題を研究する。テーマの例は以下のようなものがある。 ・連続力学系のコネクティング軌道の数値的存在検証法 ・非線形境界値問題の解の数値的存在検証法 ・非線形方程式の解集合の Krawczyk 法による存在検証 ・分岐点・特異解の数値的存在検証 ・C++ による精度保証付き数値計算ライブラリの作成と評価
キーワード	

出典: <http://www.oishi.info.waseda.ac.jp/index-j.html>

早稲田大学 理工学部 物理学科 大場・中里研究室	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	26名
代表的な研究者	大場 一郎、中里 弘道、堀田 弘志、今福 健太郎
研究概要	観測理論、散逸系の量子力学、量子力学系の時間発展、Nelson の確率過程量子化法、トンネル時間の問題、量子カオス、Parisi-Wu の確率過程量子化法、クォーク・グルーオン・プラズマ、超対称性理論、統一理論、非可換幾何学、など。
キーワード	

出典: <http://www.phys.waseda.ac.jp/hep/index-j.html>

大阪市立大学 経済学部 経済理論部門 数理経済学 塩澤ゼミ	
研究分野	経済学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	1名
代表的な研究者	塩澤 由典
研究概要	経済における複雑系を研究。現在の研究テーマは下記の通りである。 ・ 複雑系としての市場経済 ・ 制度の経済学(比較制度分析および制度進化) ・ 研究開発のマネジメント ・ 関西における新産業政策
キーワード	

出典: <http://econ-ws.econ.osaka-cu.ac.jp/~Shiozawa/s6.htm>

大阪大学 産業科学研究所 量子分子デバイス研究分野 岩崎研究室	
研究分野	電子工学
研究領域	応用システム
研究規模	19名
代表的な研究者	岩崎 裕、吉信 達夫、足立 敏之、李 楠、上田 正則
研究概要	量子機能・分子機能を用いた新しいデバイスを目指した研究を行っている。ナノエレクトロニクス、分子ナノテクノロジー、バイオエレクトロニクスなどの分野での萌芽的研究を最終目標として、量子ドットの微細構造形成、それらや酵素などの分子のシリコン基板上への配置プロセスの開発などを行ない、形成された構造・配列の電子的性質・電気特性を調べることによって画像処理などへの応用の可能性を探っている。
キーワード	微細構造、表面・界面のゆらぎ・コースニング、バイオ・化学イメージングセンサ

出典: <http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qmd/homej.html>

大阪大学 大学院 基礎工学研究科 システム人間系専攻 システム科学分野 人間情報科学講座 潮研究室	
研究分野	情報工学、制御工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	11名
代表的な研究者	潮 俊光、山本 茂
研究概要	離散事象システム、非線形システム、ハイブリッドシステムの解析と制御に関する研究を行なっている。特に、形式言語理論・オートマトン・ペトリネット等によってモデル化されたシステムのフィードバック制御に関する研究、カオスの制御・同期とその応用としてのカオス通信やカオスコーディングに関する研究、離散変数と連続変数が混在するようなハイブリッドシステムのモデリングと解析およびフィードバック制御に関する研究などを行なっている。
キーワード	

出典: <http://duke.sys.es.osaka-u.ac.jp/index-jp.html>

大阪大学 大学院 工学系研究科 機械物理工学専攻 粒子複雑系領域 辻研究室	
研究分野	物理学、機械工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	25名
代表的な研究者	辻 裕、吉岡 宗之、田中 敏嗣、川口 寿裕
研究概要	多粒子複雑系一般を対象として、1つ1つの粒子の運動を厳密な方程式に基づいて計算し、その統計的性質から全体運動を求めるような方法で研究を行なっている。このような複雑系のアプローチを用いて、小惑星、土石流、砂漠の砂の移動などの自然現象、工業装置内の粉粒体の流れなど、とくに、流動層における粉粒体流動現象を中心に数値解析を行なっている。
キーワード	流動層、混合機、粉碎機

出典: <http://www-mupf.mech.eng.osaka-u.ac.jp/>

大阪大学 大学院 工学研究科 機械物理工学専攻 複雑流体工学領域 中村研究室	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	18名
代表的な研究者	中村 喜代次、千葉 訓司、森 教安、西村 太良、小柴 孝、保田 和則、山本 剛宏
研究概要	主に連続体力学の立場から、高分子物質の流動から製品の力学までの分野に関する基礎研究を行なっている。特に、成型時の問題解明のための粘弾性流体の複雑な流路内での流れ、非定常流動に関する研究、複合材料の金型内での流動と液晶の流動に関する研究を進めている。
キーワード	

出典: <http://www-rheol.mech.eng.osaka-u.ac.jp/rheol-j.html>

大阪府立大学 工学部 数理工学科 非線形力学研究グループ	
研究分野	数学、物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	11名
代表的な研究者	田尻 昌義、中西 哲夫、福田 浩昭
研究概要	光ソリトンを用いた通信の例などのように、ソリトン・カオスといった非線形性に起因する現象を利用する工学を対象とする。そのために、数理科学の立場から、プラズマ中の非線形波動、ソリトン、非平衡状態にある多体系の統計力学、層流の不安定化等の非線形現象の研究を行なっている。
キーワード	層流の不安定化

出典: <http://www.nm.ms.osakafu-u.ac.jp/index-j.html>

筑波大学 工学システム学類 機能工学系 星野研究室	
研究分野	電子工学、情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	6名
代表的な研究者	星野 力、丸山 勉
研究概要	FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた専用ハードウェアの研究を中心に行なっている。FPGAの応用として、人工生命、複雑系、チューリング・マシン、セルラー・オートマタ、囚人のジレンマ、ゲーム理論など複雑系の各理論を考え、複雑系研究に特化した専用のハードウェアを研究している。
キーワード	

出典: <http://darwin.esys.tsukuba.ac.jp/>

筑波大学 電子・情報工学系 カオス研究室	
研究分野	数学、情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	6名
代表的な研究者	徳永 隆治
研究概要	非線形予測および分岐図再構成、カオスとその分岐構造の制御による最適化問題の解法、連続区分線形同相写像におけるカオスの自動証明アルゴリズム、といったカオス理論関連研究、平均値分離型フラクタル符号化の高画品質化、パイコネ変換およびフラクタル変換による画像領域分割、などのフラクタル画像処理関連、といった研究の他、適応的直交変換(AOT)による静止画像圧縮法、適応的直交変換(AOT)による動画像圧縮法、などの実システムへの応用研究も行なっている。
キーワード	カオス理論、フラクタル画像処理、ビデオゲーム向け要素技術

出典: <http://www.chaos.is.tsukuba.ac.jp/Welcome-j.html>

通商産業省 工業技術院 電子技術総合研究所 大域情報処理ラボ (科学技術振興調整費による中核的研究拠点(COE)育成制度 大域情報学研究グループ)	
研究分野	情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	10名
代表的な研究者	—
研究概要	科学技術振興調整費による中核的研究拠点(COE)として位置付けられた研究グループの一部であり、複数の大域的处理の手法を研究する大域情報処理の一環として複雑系研究を実施している。
キーワード	

出典: <http://www.aist.go.jp/ETL/~6844/index.html>

東海大学 科学技術研究センター 複雑系ダイナミクス研究室	
研究分野	物理学、生物科学、情報工学
研究領域	応用システム、実証実験・予測
研究規模	6名
代表的な研究者	大塚 建樹、八木原 晋、新屋敷 直木、松村 博之、深井 朋樹、佐光 興亜
研究概要	多自由度の非線形システムとしての複雑系に共通な普遍現象の抽出と新しい概念の創造、非線形ダイナミクスを特徴づける総合的な手法の開発を行なっている。とくに、量子光学複雑系、分子複雑系、脳・神経情報処理などの分野において、理論的分析からモデル化、システム開発、実験的検証まで幅広く総合的な研究を行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.asterac.se.u-tokai.ac.jp/Pro/Cdrg/Cdrg.html>

東京工業大学 大学院 情報理工学研究科 数理・計算科学専攻 鵜飼研究室	
研究分野	数学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	9名
代表的な研究者	鵜飼 正二
研究概要	微分方程式やそれに関連した問題の研究を行なっている。具体的には、様々な偏微分方程式の解の構造、カオス、フラクタルやウェーブレットの研究、計算機による微分方程式の解の存在証明など。現在は、これまでの、計算機によるシミュレーションで近似解の構造を調べたうえでその結果を用いて理論解析を行なうスタイルから、計算機を使って解の存在を厳密に証明しようという方式の研究へと変化しているところである。
キーワード	

出典: <http://www.is.titech.ac.jp/labs/ukailab/ukailab.html>

東京工業大学 大学院 情報理工学研究科 数理・計算科学専攻 渡辺研究室	
研究分野	情報工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	10名
代表的な研究者	渡辺 治、坂本 直志
研究概要	「計算の複雑さ(Computational Complexity)」に関する基礎理論と応用について研究している。テーマの例は、 ・アルゴリズムの設計・解析に関する基礎的研究 ・手に負えない問題の構造についての研究とその応用(例:暗号理論、学習理論)
キーワード	など。 計算の複雑さ(Computational Complexity)

出典: <http://www.is.titech.ac.jp/labs/watanabelab/ourhome/index-j.html>

東京工業大学 大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 複雑システム解析講座
自律分散制御分野 中野研究室

研究分野	経済学、社会学、数学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	8名
代表的な研究者	中野 文平、猪原 健弘
研究概要	社会的意決定、組織的意決定、集団意決定など、「相互作用を有した複数の主体の意決定システム」に関して研究を行なっている。ゲーム理論、数理経済学の分析手法などをツールとして用い、基礎的な数理モデルを設定して研究するスタイルを採用している。最近の研究テーマは、ハイパーゲーム理論、エージェンシ-理論、交渉理論、社会選択論、インプレメンテーション理論など。
キーワード	

出典: <http://nash.dis.titech.ac.jp/index.html>

東京工業大学 大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 複雑システム解析講座
適応学習システム分野 伊藤研究室

研究分野	生物科学、制御工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	14名
代表的な研究者	伊藤 宏司、鄭 心知
研究概要	自己組織的に形成される生体の知覚・行動機能と同様の機能を持つ知覚・行動システムを人工的に構築するための理論と設計法の開発を目指している。自己組織化創発機能の非線形力学的観点による解析によって機能形成の理論的枠組みを研究し、これらに基づいて身体動作のパターン形成、運動・行動学習のメカニズムを解明する。また、ロボットの強調制御、群ロボットの行動創発、サイバネティック義手への応用なども研究している。
キーワード	

出典: <http://www.ito.dis.titech.ac.jp/>

東京工業大学 大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 複雑システム解析講座
適応学習システム分野 三宅研究室

研究分野	生物科学、情報工学、制御工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	14名
代表的な研究者	三宅 美博
研究概要	「共創」という生成的現象を研究対象としている。「共創」を捉えるために「開かれた自己言及」と「2中心モデル」という概念装置を導入した。その上で、生物から学ぶ研究、その理論的枠組みを構成する研究、人工システムを通じて社会へ開く研究の3つのアプローチで研究を行なっている。具体的には、粘菌という生物における形態形成プロセスを共創のメタファーとして捉える解析を行ない、自己組織系の理論的枠組みを拡張することによって共創の理論的モデルを提供、また、ロボットという人工知能システムにおいてその歩行介助を通じた人間との共創の実現を目指している。
キーワード	場、エンタテインメント、2中心モデル

出典: <http://www.myk.dis.titech.ac.jp/>

東京工業大学 大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 複雑システム解析講座
複雑システム数理分野 原研究室

研究分野	制御工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	—
代表的な研究者	原 辰次
研究概要	システム制御理論を柱に、複雑・大規模・分散化するシステムの高速かつ高精度な制御系の実現を目指して、制御系の解析・設計を統一的に扱うことができる新しい理論の枠組みの構築と制御理論的アプローチによる複雑系解析を目標に研究を進めている。これに関する研究テーマには、ロバスト制御、ハイブリッド制御、学習制御などがある。
キーワード	システム制御理論、複雑系解析、計算機援用設計

出典: <http://midget.cs.dis.titech.ac.jp/staff/hara.html>

東京工業大学 大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻 複雑システム解析講座 複雑システム数理分野 松野研究室	
研究分野	宇宙科学、機械工学、制御工学
研究領域	応用システム
研究規模	13名
代表的な研究者	松野 文俊
研究概要	制御・宇宙・ロボット・人間機械強調をキーワードとして、地球を含めた宇宙における物理現象を力学的に解析、自然界の法則にあった宇宙開発システムを研究している。また、人間がスキルを獲得するシステムを解析し、ロボットに実現するための手法や、実環境にロボットが入ってきた場合の人間とロボットとの強調についての研究も行なっている。
キーワード	制御、宇宙、ロボット、人間機械協調

出典: http://www.cs.dis.titech.ac.jp/matsuno-lab/home_j.html

東京大学 気候システム研究センター 気候解析分野 新田研究室	
研究分野	地球科学
研究領域	実証実験・予測
研究規模	—
代表的な研究者	木本 昌秀
研究概要	現実の気候システムの持つ時間・空間構造は何か、また太陽-海洋-陸地面の相互作用はどのように行なわれているか、これらの問題を明らかにし、また現在世界各地で起きている異常気象の要因の分析を行なう。分析はモデルを構築することによって行い、各種の理論・数値モデルを用いて検討した結果と実際の結果を比較することによりモデルの改良を行なっている。具体的な研究テーマは、気候モデルの検証と改良、地球温暖化現象の検出、気候システムの年～数十年変動の解明、組織化された熱帯対流活動の特徴の把握、中・高緯度大気中の長周期変動の解明、異常気象の要因の分析、など。
キーワード	

出典: <http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/jhtml/jdiag.html>

東京大学 工学部 計数工学科 数理第6研究室	
研究分野	数学、情報工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	16名
代表的な研究者	岡部 靖憲、堀田 武彦、松本 啓史
研究概要	下記のテーマでカオス、フラクタル、情報理論の研究を行なっている。実験数学 / 非線型時系列解析 - 定常性検定、予測、因果解析 / 複雑系 / 非平衡統計力学 - 揺動散逸定理 / カオス / フラクタル / マルチフラクタル / 量子推定理論 / 量子情報理論 / 情報幾何学 / ニューラルネットワーク、など。
キーワード	実験数学、カオス、フラクタル、マルチフラクタル

出典: <http://www.expm.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑システム大講座 生体複雑学研究室	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	11名
代表的な研究者	武田 常広、眞溪 歩
研究概要	脳の活動を磁場変化によって計測する全頭型脳磁計(Magnetoencephalography, MEG)や、眼の3大機能を同時計測可能な3次元オプトメータ(Three Dimensional Optometer, TDO)を使用して、データから脳の機能を推定し提示する手法の開発や、脳のモデルから人間の脳機能の本質を明らかにする研究を行なっている。
キーワード	MEG計測による脳機能の解明、3次元オプトメータによる視覚系の機能解析

出典: <http://www.bcl.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑システム大講座 複雑学原論研究室	
研究分野	生物科学、数学、情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	17名
代表的な研究者	合原 一幸、村重 淳、下川 英敏
研究概要	脳における情報表現、樹状突起のモデル、記憶のモデル、ニューラルネットワーク、ニューラルシステムにおけるカオス、脳の高次機能、免疫系、進化、力学系の確率的な手法による解析、ウェーブレット、音源の分離(カクテルパーティー効果)、などについて、数理的な手法を用いて研究を行なっている。
キーワード	脳の数理モデル、カオス工学

出典: <http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑システム大講座 複雑計算科学研究室	
研究分野	情報工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション、応用システム
研究規模	6名
代表的な研究者	西田 友是、森下 真一
研究概要	複雑な現象を解析する際に必要な計算機科学の基礎として、データベース理論、知識発見の手法、解析・シミュレーションの際の可視化技術(CG)などに関する研究を行なっている。具体的な研究例には、解析・シミュレーション結果の可視化や、設計支援システムにおけるGUI などへの CG の応用、ゲノムサイエンス・ゲノム情報解析へのデータベース応用、などがある。
キーワード	

出典: <http://nis-lab.is.s.u-tokyo.ac.jp/>

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑システム大講座 複雑行動知能学研究室	
研究分野	制御工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	19名
代表的な研究者	木村 英紀、津村 幸治、大石 泰章
研究概要	制御理論を中心に、計算の複雑さや自律分散システムなどの複雑系に関する研究を行なっている。おもな研究トピックは、ロバスト制御、 H^∞ 制御・ μ 解析、システム同定、量子制御・メゾスコピック系の制御、群モジュール・創発システム、インテグリティ、免疫系、自己組織系、カオスの応用、適応制御、ウェーブレット解析、など。
キーワード	制御理論、ロバスト制御、 H^∞ 制御・ μ 解析、システム同定、自律分散システム、群モジュール・創発システム、インテグリティ、カオスの応用

出典: <http://www.crux.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑系実験大講座 巨視的複雑系科学研究室

研究分野	地球科学、地学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	—
代表的な研究者	鳥海 光弘
研究概要	地球や惑星内部を階層的に支配している様々な複雑現象の時空間における基本的な関係の解明と本質の理解を研究の目標としている。それらの複雑現象は、結晶や流体の原子レベルの拡散から全マントル対流運動まで、反応時間と空間スケールにおいて微小スケールから数-数十億年スケールあるいは全地球スケールまで幅広く多岐にわたる。
キーワード	

出典: <http://www.k.u-tokyo.ac.jp/complex/labs.htm>

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑系実験大講座 強相関複雑系科学研究室

研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	11名
代表的な研究者	藤森 淳、溝川 貴司
研究概要	強く相互作用する電子系や電子-格子結合系の示す様々な基底状態、相転移現象、相転移近傍の臨界的な振舞い、量子ゆらぎなどを対象として、固体の電子物性の研究を行なっている。具体的な研究例は、金属-絶縁体転移近傍の電子状態、スピン-電荷-軌道結合系の新しい物性、電子-格子強結合系と超伝導体の電子状態、重い電子・近藤格子系、など。
キーワード	

出典: <http://wyvern.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑系実験大講座 集団現象物理研究室

研究分野	物理学、原子力工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	11名
代表的な研究者	高瀬 雄一、江尻 晶
研究概要	プラズマ中の乱流・自己組織化、波動を使った加熱・電流駆動、熱・粒子の輸送とその低減、電磁流体力学(MHD)不安定性とその安定化、高温プラズマ計測器の開発研究、などの研究テーマで、核融合プラズマ中の物理現象の研究を行なっている。
キーワード	

出典: <http://plasma.phys.s.u-tokyo.ac.jp/shuudan.html>

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑系実験大講座 複合非線形科学研究室

研究分野	宇宙科学、地球科学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	—
代表的な研究者	松井 孝典
研究概要	地球・惑星システムの物質あるいはエネルギーの流れが、個々の物質圏から如何に変化して現在の物質圏に進化したかを探るとい う立場で、地球・惑星の進化を研究している。従来の地球惑星科 学と異なり、気圏、水圏、地圏だけでなく、生物圏や人間圏まで 含めた全てを複雑系として研究対象とする点が新しい。
キーワード	

出典: <http://www.k.u-tokyo.ac.jp/complex/labs.htm>

東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 複雑系実験大講座 複雑物質化学研究室

研究分野	化学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	19名
代表的な研究者	斉木 幸一朗、佐々木 岳彦
研究概要	固体表面における原子・分子の挙動の解明、およびそれらを制 御して新たな構造・機能を発現させる研究を行なっている。反応 場となる固体表面を原子レベルで評価・観察し、その表面上に原 子・分子を積層させるヘテロ構造構築による新奇表面物性や成長 素過程の探索と新たな表面分析手法による吸着状態や反応素過程 の解明を目指す。
キーワード	

出典: <http://www.k.u-tokyo.ac.jp/complex/labs.htm>

東京大学 大学院 総合文化研究科 広域システム科学系 物理 池上研究室	
研究分野	物理学、数学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	15名
代表的な研究者	池上 高志
研究概要	カオスと進化・生態系、突然変異と自己複製、言語的相互作用のモデルと理解、計算の理論、新しいゲーム理論、などの問題を題材として、構成論的なモデル作成を試みている。因果のネットワーク、内部と外部、創発と起源といった3つの要素を重要視したモデルを考え、物理系におけるこれまでのモデルとは異なるアプローチで複雑系の諸問題の解析を進めている。
キーワード	

出典: <http://infidel.c.u-tokyo.ac.jp/japanese/>

東京大学 大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 関連基礎科学系 複雑系解析学大講座	
研究分野	物理学、生物科学、社会学、化学、数学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	12名
代表的な研究者	市村 宗武、大西 直毅、金子 邦彦、国場 敦夫、佐々 真一、鈴木 淳史、多賀 徹太郎、野口 徹、波田野 彰、氷上 忍、樋口 三郎、山内 薫
研究概要	原子核、原子分子、個体物理、流体、マクロな気象、生命系、社会現象といった幅広い分野を対象として、自然界と社会における複雑さの起源や記述法の探求、理解を目指している。手法としては非線形動力学、統計力学などを用い、モデル化とシミュレーションにより解析を進める。特に研究しているテーマは、大自由度のカオスや時空カオス、量子カオス、有限量子多体系としての原子核、多くの要素からなる乱雑さを含んだ系、などである。
キーワード	

出典: <http://db.s.c.u-tokyo.ac.jp/syukai.html.ja#fukuzatsu>

東京大学 大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC) 鳳・藤島研究室	
研究分野	電子工学
研究領域	応用システム
研究規模	13名
代表的な研究者	鳳 紘一郎、藤島 実、北澤 清子、韓 小逸
研究概要	半導体デバイスにおけるカオスと集積カオス発生器、LSIにおける配線問題、低障壁ショットキー接合をソース・ドレインに用いたMOSFET、単電子デバイスおよび回路の工学応用、演算器のスタガー並列を用いた集積回路の高速化、マイクロヒューマンセンサ、といったテーマで、集積回路に関する研究を行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.sf.t.u-tokyo.ac.jp/Japanese/>

東京大学 大学院 教育学研究科 身体教育学研究室 教育生理学分野	
研究分野	教育学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	1名
代表的な研究者	山本 義春
研究概要	下記の研究を通じて、生体における複雑系を研究している。運動生理学の研究、生体ゆらぎの研究、ゆらぎと”ホメオスタシス”、”ホメオスタシス”と健康、ゆらぎと時系列解析、生体ゆらぎの機能的意義、身体と複雑系、生理学とカオス、心拍ゆらぎの非定常解析、生体ゆらぎと神経系のダイナミクス、ヒトの神経系の発達。
キーワード	

出典: <http://www.p.u-tokyo.ac.jp/~yamamoto/>

東京大学 大学院 工学系研究科 システム量子工学専攻 鈴木研究室	
研究分野	原子力工学
研究領域	応用システム、実証実験・予測
研究規模	16名
代表的な研究者	鈴木 篤之、長崎 晋也、長谷川 秀一、大森 良太、等々力 賢
研究概要	地球、太陽と宇宙のエネルギーのもとになっている書くエネルギーについて、工業設計(Engineering Design)の立場での研究を行なっている。現在の研究テーマは、原子核の量子光学的性質を利用したレーザーによる超精密分離分析技術の開発、量子化学計算による固液界面反応のシミュレーションと新抽出剤や吸着剤の開発、高レベル放射性廃棄物の環境安全解析と新しい長期深地下貯蔵システムの開発、プルトニウムのリサイクル利用に関するシステム設計と燃料サイクル計画の最適化、ポスト冷戦時代における核軍縮への技術的貢献と国際協力に関するシステム設計、グローバルエネルギーのシステム設計における核エネルギーの科学技術論的分析、未来予測データのカオス性の解析と核エネルギー技術社会の複雑系科学、など。
キーワード	Engineering Science (E S) 、Engineering Design (E D)

出典: http://lyman.q.t.u-tokyo.ac.jp/lab_intro_jpn.html

東京大学 大学院 工学系研究科 化学システム工学専攻 堤研究室	
研究分野	化学
研究領域	応用システム
研究規模	21名
代表的な研究者	吉田 邦夫、堤 敦司、倉本 浩司
研究概要	クリーンなエネルギーシステムの確立、エネルギー消費の少ない新しいプロセスおよびエネルギー有効利用技術の開発によるエネルギー・環境問題の解決に寄与することを目指している。研究テーマは、熱・化学エネルギーの革新的利用技術の開発、新しい微粒子プロセスの開発、カオス・フラクタルなど複雑系のパラダイムを利用した省資源・省エネルギー型生産プロセス設計手法の開発、など。
キーワード	

出典: <http://www.chemsys.t.u-tokyo.ac.jp/chemsys/intro/tsutsumi.html>

東京大学 大学院 工学系研究科 機械工学専攻 庄司・丸山研究室	
研究分野	機械工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	20名
代表的な研究者	庄司 正弘、丸山 茂夫
研究概要	サーモサイフォン(垂直に置かれた環状パイプの下半分を加熱し上半分を冷却するような系)におけるカオスの挙動に関する研究を行っている。上部と下部の温度差が小さいときは系は安定し、温度差を増やすにつれて流体が定常的に移動する系となる。さらに温度差を拡大すると、流体はカオスの状況を示すようになる。
キーワード	

出典: <http://www.photon.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

東京大学 大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 関連基礎科学系 金子研究室	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	15名
代表的な研究者	金子 邦彦、多賀 巖太郎
研究概要	時空カオス、大自由度カオス、脳のダイナミクス、生物ネットワーク系の進化への数理的アプローチなどを題材として、「非線形の高自由度系のダイナミクスを分解せずに捉える」方法論を研究している。また、このような複雑系の方法、概念の確立を目標に、主にコンピュータシミュレーションを用いた発見的研究により、生物情報処理を含む理論生物学の構築も目指している。
キーワード	

出典: http://chaos.c.u-tokyo.ac.jp/index_j.html

東京大学 大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 相関基礎科学系 佐々研究室	
研究分野	数学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	7名
代表的な研究者	佐々 真一
研究概要	様々な非平衡現象に対し数理的モデルを作ること为目标に研究している。主に、流体系、破壊、粉体系、化学反応系、細胞多体系などの空間パターンが動的に時間発展する現象を対象とする。簡単な数学モデルの作り出す複雑な振舞いと非平衡現象の対応を研究する一方、力学系理論、アルゴリズム論、計算理論など、いくつかの数学の分野の枠組みを参照しながら、これらの理論的な体系化も目指している。
キーワード	

出典: <http://dbs.c.u-tokyo.ac.jp/labs/sasa/>

東京大学 大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 相関基礎科学系 染田研究室	
研究分野	化学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	6名
代表的な研究者	染田 清彦
研究概要	カオスの分子衝突・カオスの分子振動の量子ダイナミックス、化学反応ダイナミックスの基礎理論の構築、化学反応論の新しい局面の開拓、といったテーマで、化学反応のダイナミックスを理論的に研究している。化学反応を「量子カオス理論」まで立ち返り、カオスの衝突とカオスの分子振動の量子ダイナミックスを研究している。また、統計的な数理的手法を用いた、新しい化学反応の基礎理論の構築や、微視的理解の上に立脚した巨視的な化学反応論の再検討・再構築を模索している。
キーワード	

出典: <http://dbs.c.u-tokyo.ac.jp/labs/someda/index.html.ja>

東京大学 大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 関連基礎科学系 氷上研究室	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	8名
代表的な研究者	氷上 忍、樋口 三郎
研究概要	量子統計力学と量子場の理論に基づいた理論物理学の研究を行なっている。高温超伝導体のゆらぎ、長距離相互作用する電子系、量子ホール効果、スピン系の相転移、量子重力、弦の場の理論、ランダム行列理論によるメソスコピック系のゆらぎの普遍性の解析などが最近の研究テーマである。場の量子論による問題解決の他、コンピュータを用いた数値計算も利用している。
キーワード	

出典: <http://rice.c.u-tokyo.ac.jp/>

東京電機大学 工学部 電子工学科 電子回路研究室(堀尾研)	
研究分野	電子工学
研究領域	応用システム
研究規模	9名
代表的な研究者	堀尾 喜彦
研究概要	「Magic」という設計ソフトウェアを利用し、カオスニューラル非線形関数回路の設計を行なっている。設計した LSI は実際に製造し、評価まで行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.d.dendai.ac.jp/lsi/index-j.html>

東京電機大学 理工学部 数理科学科 桐木紳研究室	
研究分野	数学、物理学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	10名
代表的な研究者	桐木 紳
研究概要	力学系のカオスの性質について研究・教育を行なっている。主にその数値理論、数値実験などの研究を進めている。最近のトピックは、2次元ヘノン写像の高次元への拡張としての3次元ヘノン写像の数値実験結果など。
キーワード	

出典: <http://www.r.dendai.ac.jp/lab/kiriki1/kiriki.jap/main.html>

東京農工大学 工学部 物理システム工学科 複雑系研究分野	
研究分野	物理学、原子力工学、生物科学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	—
代表的な研究者	岡田 利男、松井 芳子、村瀬 千明、中島 春彦、尾崎 忠男、佐野理、鈴木 勝博
研究概要	複雑な多成分の高分子液体や、ゲル(高分子のネットワーク)などの相図を、統計力学の理論と計算機シミュレーションをによって研究している。複雑な超分子機能物質である蛋白質の折り畳み現象、脳の機能をモデル化した神経ネットワーク、プラズマの理論的研究と計算機シミュレーション、プラズマの非線形現象としてのカオスの研究などを行なっている。
キーワード	

出典: <http://cairo.ei.tuat.ac.jp/complex.html>

東京複雑系	
研究分野	物理学、生物科学、数学、情報工学、社会学
研究領域	—
研究規模	63名
代表的な研究者	藤本 仰一、片岡 直人、澤井 哲、佐藤 譲、柴田 達夫、古澤 力
研究概要	若手複雑系研究者による研究グループである。研究分野、研究領域は複雑系に関するもの全般を対象とする。各人の専門分野を越えた交流を図ることをひとつの目的とし、統計物理学、量子力学、生命の理論/実験、脳の理論/実験、力学系、計算理論、など複雑系に関する幅広い交流による新たな知見の獲得を狙いとする。
キーワード	

出典: <http://chaos.c.u-tokyo.ac.jp/TokyoComplex/>

東京理科大学 経営学部 経営学研究科 齊藤研究室	
研究分野	情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	2名
代表的な研究者	齊藤 進
研究概要	NP問題の最適解を求めるために、コンピュータ上でモデル化し正確なモデルを構築する部分が問題解析系分野の対象とする研究内容である。具体例としては、組み合わせ最適化問題、カオス時系列データの解析及び予測、非線形経済動学、など。また、問題解析のための手法開発も行なっており、具体的なテーマには、遺伝的アルゴリズム、ニューラルネットワーク、ウイルス進化アルゴリズム、ヒューリスティクス、分岐限定法などがある。
キーワード	

出典: <http://www.ms.kuki.sut.ac.jp/KMSLab/ssaito/r.htm>

東北大学 大学院 理学研究科 物理学専攻 物性理論研究室 小川研究グループ	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	8名
代表的な研究者	小川 哲生
研究概要	物性物理学を中心に、低次元量子流体、低次元多励起子系、非平衡力学系、非線形光学、量子光学、量子力学の観測問題など様々な物理学分野に跨る研究を行なっている。最近の研究テーマは、低次元量子多体系の線形光学応答、低次元量子多体系の非線形光学応答、量子化された光子場と電子系との非線形相互作用、量子化された光パルスの空間伝搬と自己収束のダイナミクス、量子力学的連続測定と量子カオスの問題、光誘起構造相転移の量子ダイナミクス、ランダム系での複合粒子系のホッピングとトンネルダイナミクスと非マルコフ緩和、など。
キーワード	低次元多電子系/低次元多励起子系/低次元電子-格子系の動的応答理論、量子光学/非線形光学、量子力学基礎論と観測問題、非平衡非線形系の動的相転移ダイナミクスと緩和散逸現象、量子-古典クロスオーバー

出典: <http://www.cmpt.phys.tohoku.ac.jp/%7Eogawa/cover.html>

東北大学 電気通信研究所 沢田研究室	
研究分野	生物科学、電子工学、情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	27名
代表的な研究者	沢田 康次、佐野 雅己、早川 美徳、早川 吉弘
研究概要	脳や生体などに代表される複雑システムの非線形動力学や、知的情報処理システムへのそれらの応用を研究している。腔腸動物ヒドラの細胞解離からの再生機構を分析することにより生体の秩序と生命状態の関係を研究する一方、脳に近い機能を持つブレインコンピューティングアーキテクチャの構築を進めてきた。現在は、ブレインコンピューティングの要件である柔軟かつ適切な情報処理に必要なリアルタイムシミュレータの研究、高度な判断処理に必要なアクティブ情報処理の研究、複雑システムの非線形物理学に基づく理解、フラクタルやカオス時系列等の情報処理への応用、などを研究中。
キーワード	

出典: <http://www.sawada.riec.tohoku.ac.jp/index-j.html>

東洋大学 経営学部 経営学科 旭ゼミ	
研究分野	社会学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	1名
代表的な研究者	旭 貴朗
研究概要	意思決定者たちがメッセージを交換しながら共同作業を行なうシステムについて、なぜ組織はつねに利害調整をおこなっているのか、なぜ組織は期待した方向に向かっているのか、なぜ人間は共同作業をすることができるのか、なぜ組織は情報システム基盤を必要とするのか、情報システム基盤は、企業のあり方を根本的に変えるのだろうか、といったテーマについて、パソコンによるシミュレーションなどを用いながら研究を行なっている。
キーワード	階層と調整、進化ゲーム、一般システム理論

出典: <http://www.mng.toyo.ac.jp/~asahi/index.html>

奈良女子大学 理学部 物理科学科 複雑系研究室	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	10名
代表的な研究者	上江洌 達也、田崎 秀一、狐崎 創
研究概要	平衡および非平衡統計力学、非線形動力学、カオス、ニューラルネットワーク、免疫系のネットワーク、パターン形成などを研究課題とし、複雑系と称される系について物理的な観点から研究を行なっている。
キーワード	

出典: <http://minnie.disney.phys.nara-wu.ac.jp/>

奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 複雑系解析学講座	
研究分野	物理学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	9名
代表的な研究者	相原 正樹、高橋 聡、稲垣 剛
研究概要	物理現象における非平衡状態の複雑系が研究対象である。なかでも、レーザー光による凝縮物質の光励起状態を中心とし、高密度電子正孔系や低次元系の高励起状態などの光誘起複雑系の解析を進めている。解析のために、量子統計力学用の数式処理ソフトウェアを独自に開発したり、並列計算機による数値計算を併用するなど、理論的研究だけでなく複雑系解析手法を積極的に取り入れて研究を行なっている。
キーワード	量子統計力学用の数式処理ソフトのライブラリー、並列計算機による数値計算

出典: <http://msw3.aist-nara.ac.jp/ms/LABs/aihara/aihara.html>

農林水産省 農業環境技術研究所 複雑性議論集団 D G C (Discussion Group on Complexity)	
研究分野	—
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	約150名
代表的な研究者	—
研究概要	複雑系に関して議論を行なう研究グループである。「要素と全体の関係」を積極的に考え、新しい学問の流れを作り出すことを考えている。その際、不毛な一般化や現象からの遊離に陥らないように「現象論」を中心として議論を行なう。具体的には、自然科学系だけでなく社会科学系まで幅広い研究分野を「要素と全体の関係」という関連で捉え、それぞれの分野の中での類似性やお互いの分野の普遍性を、議論を通じて獲得することを目指している。
キーワード	

出典: http://www.affrc.go.jp:8001/dgc/DGC_J.html

富山大学 工学部 知能情報工学科 知能システム工学第4講座	
研究分野	情報工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	3名
代表的な研究者	広瀬 貞樹
研究概要	以下のような観点から、知識情報処理に関する研究を行なっている。 アルゴリズム解析 — アルゴリズムに関して時間・空間効率を理論的に解析し、より良いアルゴリズムの開発を行なう。 仮説推論システム — 実用的な人工知能システムの枠組みとなる仮説推論システムの高速化を目指す。 オートマトン・言語処理 — 文法の生成、言語の族の表現などを中心に、計算機科学の基礎分野であるオートマトン・言語理論を研究する。
キーワード	自己増殖ループ

出典: <http://www.algo.ecs.toyama-u.ac.jp/>

富士総合研究所 解析技術第一部 複雑系プロジェクト	
研究分野	物理学、土木工学、情報工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	—
代表的な研究者	—
研究概要	格子ボルツマン法による流体解析、格子ガス法による流体解析、セルラオートマトン法による粒状体解析、セルラオートマトン用並列コンパイラ、などを例題として、複雑系の手法を利用した解析を行なっている。
キーワード	

出典: http://www.fuji-ric.co.jp/complex/complex_index.htm

富士総合研究所 計算科学研究センター (科学技術振興調整費による人間系の特性を考慮した大規模・複雑システムのモデル化、解析、制御、設計に関する総合研究)	
研究分野	情報工学、数学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	27名
代表的な研究者	大須賀 節雄、岩田 修一、小川 泰、小池 秀耀
研究概要	大規模・複雑システムのモデル化、解析、制御、設計手法などを確立するために、従来の手法にかわる新しい方法論を模索する。関連する個々の事例をベースとした実践的研究を通じ、それらの事例に普遍的な方法論を確立する。具体的には、複雑システムのモデル化、解析、制御、設計の方法論を確立し、概念やモデルを統合したソフトウェアシステムとして具体化することが目的である。
キーワード	複雑システムのモデリングに関する研究、複雑性の科学に関する研究、複雑性の情報処理技術の研究、「複雑性の科学技術」のためのソフトウェア・システムの研究開発

出典: <http://stsn02.fuji-ric.co.jp/ccse/sta-comp/index.html>

富士通総研 研究開発部	
研究分野	経済学、情報工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション、応用システム
研究規模	—
代表的な研究者	—
研究概要	フラクタル・カオス理論など複雑系技術の実用化、ネットワークにおける高度な知的代理機能を持ったエージェント型アプリケーションの開発、電子マネーを活用した現在の金銭体系とは次元の異なる新しい社会システムの実現などにむけて、研究開発を行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.fri.co.jp/rd/syukai.html>

福井県立大学「複雑系の科学」研究会	
研究分野	生物科学、物理学
研究領域	—
研究規模	—
代表的な研究者	山川 修、中村 量空
研究概要	福井県立大学情報センターの山川修氏および生物資源学部の中村量空氏を中心とした複雑系に関する研究会。
キーワード	

出典: <http://laputa.fpu.ac.jp/index.html>

福井大学 工学部 応用物理学科 物性基礎講座 高エネルギーと複雑系研究室	
研究分野	情報工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	3名
代表的な研究者	工藤 清
研究概要	自己組織化、ルール変化を伴うセルラーオートマタ、セルラーニューラルネットワークによる適応行動など。
キーワード	

出典: http://dirac.aphy.fukui-u.ac.jp/Labo_Kudo/

福井大学 工学部 機械工学科 システム制御工学講座（朝倉・見浪・高橋研究室）	
研究分野	機械工学、制御工学
研究領域	応用システム
研究規模	21名
代表的な研究者	朝倉 俊行、見浪 護、高橋 善雄
研究概要	機械・システムの動的挙動の解析とモデリング、計測、制御およびメカトロニクスに関する研究を行なっている。複雑な運動の高精度解析計算法、構造物・振動制御系の設計法、計測情報の最適処理とその挙動の最適制御法、制御理論の実システムへの応用、所定の運動特性を備えたロボット、ロボットのファジー制御等コンピュータ支援によるインテリジェント化、などに関する研究を進めている。
キーワード	制御と計測に関する研究、ロボット制御、システム制御、画像認識、流体信号伝送と音声解析

出典: <http://scmc.mech.fukui-u.ac.jp/>

複雑系仮想研究所	
研究分野	哲学、経済学、生物科学、情報工学
研究領域	—
研究規模	220名
代表的な研究者	井庭 崇、福原 義久
研究概要	複雑系一般に関する議論、複雑系への取り組みに関する哲学・思想的な議論、生命へのアプローチ(人工生命)、脳へのアプローチ(動的な脳モデル)、社会・経済へのアプローチ(エージェントベース経済学)などにかんして議論・研究を行ない、ホームページや雑誌、書籍などの記事情報を通じて世の中に還元することを目的とした仮想組織である。
キーワード	

出典: <http://complex.novel.mag.keio.ac.jp/index.html>

文部省 核融合科学研究所 理論・シミュレーション研究センター	
研究分野	原子力工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	約20名
代表的な研究者	林 隆也、佐藤 哲也、木田 重雄、羽鳥 尹承、堀内 利得
研究概要	ヘリカル配位プラズマ、トカマクプラズマ、CT/RFPプラズマ、基礎プラズマなどの核融合プラズマについて、その複雑・多様な振舞いを理解することを目指し、大規模計算機シミュレーションによる研究を行なっている。また、このようなシミュレーションと同時に、数値解析手法の開発や、数値データの可視化に関する研究も進めている。
キーワード	

出典: <http://www.theory.nifs.ac.jp/index-j.html>

文部省科学研究費補助金採択課題 1998年度基盤研究B「形式的方法による複雑系数理の基礎研究」	
研究分野	数学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	34名
代表的な研究者	辻下 徹
研究概要	複雑系を適切に記述することを可能にするための、様々な数学的枠組みの発見と開発を長期的な目標としている。当面は、現代数学の諸分野の専門家による複雑系の諸問題の分析と数学的定式化の試みを通じ、複雑系研究に対する数学の諸理論の意義や、複雑系の数理的な理解に不足していることを明確にすることを目指している。
キーワード	

出典: <http://fcs.math.sci.hokudai.ac.jp/kaken/index.html>

北海道大学 工学系研究科 システム情報工学専攻 複雑系工学講座 混沌系工学分野	
研究分野	機械工学、情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	14名
代表的な研究者	和田 充雄、三上 貞芳、山口 明宏、久保 正男
研究概要	生命、心、人間、社会、物理現象など、自然と人間に関する複雑系の仕組みに関して工学的見地から解析し、機械に応用する研究開発を進めている。複数のロボットの行動の組合せを研究する群ロボット、協調ロボット、心の情報を伝えるインタフェースなど
キーワード	新しいパラダイムの情報工学、機械工学を目指している。 群れによる知的行動の発現、心が伝わるインターフェース、人・自然との協調ロボット

出典: <http://chaos1.complex.eng.hokudai.ac.jp/index.html>

北海道大学 工学系研究科 システム情報工学専攻 複雑系工学講座 自律系工学分野	
研究分野	生物科学、機械工学、情報工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション、応用システム
研究規模	29名
代表的な研究者	嘉数 侑昇、横井 浩史、成瀬 継太郎
研究概要	周囲との複雑な関わりを持ちながら自己組織的に創造していくシステムとして生命をとらえ、その仕組みの理論的解明と人工生命生成の研究を行なっている。主な研究対象は、人工生命、人工生態系、アニマト(アニマルもどき)。これらに関し、コンピュータ上でのシミュレーション、仮想的実現や、実際のロボット作成に関する研究を実施している。
キーワード	人工生命、アニマト、ロボット

出典: <http://junji.complex.eng.hokudai.ac.jp/index-jp.html>

北海道大学 工学系研究科 システム情報工学専攻 複雑系工学講座 調和系工学分野	
研究分野	情報工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	21名
代表的な研究者	大内 東、鈴木 忠二、山本 雅人
研究概要	複数のシステムが相互に干渉し合う状況を複雑系(調和系)としてとらえ、それらの基礎となる知的システム理論、システムデザインなどの理論とその応用に関する研究を行なっている。研究分野は、システム工学理論、エージェント理論、ゲーム理論など。
キーワード	システム工学理論、エージェント理論、ゲーム理論

出典: <http://ses3.complex.eng.hokudai.ac.jp/>

北海道大学 工学系研究科 システム情報工学専攻 複雑系工学講座 表現系工学分野	
研究分野	情報工学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	10名
代表的な研究者	宮本 衛市、赤間 清、渡邊 慎哉
研究概要	人間の意志をコンピュータに伝えるための計算の仕組みを研究している。コンピュータに高度な知能を与える方法、人間とコンピュータ間の意思疎通に用いる言語、問題解法の研究など。主な研究対象はプログラム言語、自然言語理解、並列計算、人工知能、学習システム。
キーワード	プログラム言語、人工知能、学習システム

出典: <http://lis2.huie.hokudai.ac.jp/>

北海道大学 大学院 理学研究科 数学専攻 応用数学系 (複雑系セミナー)	
研究分野	数学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	—
代表的な研究者	辻下 徹、津田 一郎、辻井 正人、松本 健司、行木 孝夫、柳田 達男
研究概要	カオスの力学系など、複雑系の数学を中心として研究を行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.math.hokudai.ac.jp/index-j.html>

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 知識システム基礎学専攻 複雑系解析論講座 中森・橋本研究室	
研究分野	情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	11名
代表的な研究者	中森 義輝、橋本 敬、領家 美奈
研究概要	進化システム方法論による複雑系解析・知識獲得法、マルチエージェントモデルによるシミュレーション、カオスモデルによる自然および社会現象の分析、環境情報とモデルの統合化・シナリオベースの構築、大規模システムの大局的予測モデルの構築手法、主観的・感覚的評価構造の分析(価値→印象→行動)、感性データ解析によるモデリング(ファジィ理論)、日本的システム方法論の開発、といったテーマで複雑系に関する研究を行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.jaist.ac.jp/ks/labs/nakamori/kouza.html>

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 複雑系の科学 (富士通)寄附講座	
研究分野	社会学、経済学、情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	—
代表的な研究者	津田 一郎、塩沢 由典、佐倉 統、徳永 幸彦、フリードリッヒ・ファイファ
研究概要	富士通株式会社からの奨学寄付金による寄付講座。食糧問題、エネルギー問題、地球環境問題など複雑系の諸問題に対し、各専門知識の集積による知識ベースの開発と応用、問題のモデル化などによる解決を研究する。
キーワード	

出典: <http://www.jaist.ac.jp/ks/kifukouza.html>

未来工学研究所 Complexity Science Community	
研究分野	—
研究領域	—
研究規模	—
代表的な研究者	新井 米秋、小林 俊哉
研究概要	1998年11月に発足したコミュニティで、研究分野は現在模索状態である。国内の自然科学から人文社会科学まですべての複雑系に関心ある研究者に対し、自由なディスカッションの場の提供、新しい研究テーマの募集を行なっている。また、ユニークな研究テーマには研究助成金の提供も行なう。
キーワード	

出典: <http://mcp.ntt-v.or.jp/>

名古屋大学 大学院 工学研究科 機械情報システム工学専攻 統計シミュレーション工学講座	
研究分野	物理学、機械工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	18名
代表的な研究者	中村育雄、酒井 康彦、櫛田 武広
研究概要	乱流の統計的な理解とその応用に関して研究を行なっている。具体的な研究テーマは、乱流複雑系の統計シミュレーション、乱流のランダム渦シミュレーション、乱流境界層のフラクタル特性と抵抗減少の研究、大型風洞による乱流と物体の干渉の研究、反応性乱流の測定と確率シミュレーション、乱流せん断流中の速度、スカラー場の能動制御、乱流噴流の速度・スカラー統計量の研究、等方性乱流の直接シミュレーション、確率過程モデルによる乱流混合のシミュレーション、円管内乱流拡散の研究、二酸化炭素ガスの乱流濃度変動の研究、流体における制御の応用、など。
キーワード	

出典: <http://www.sps.mech.nagoya-u.ac.jp/index.html>

名古屋大学 大学院 工学研究科 計算理工学専攻 複雑システム工学講座	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	17名
代表的な研究者	古橋 武、児玉 哲司
研究概要	ファジイ理論、遺伝的アルゴリズム、カオス、ニューラルネットワークなどをツールに用い、生物進化、脳の知識表現について探求し、複雑系研究として新しい人工知能工学の創成を目指している。また、ソフトコンピューティングと題して、従来の厳密な情報処理と異なりあいまいさを扱うことのできる柔らかな情報処理手法を検討し、その実現と新しい情報処理工学の構築を目指して研究を行なっている。
キーワード	複雑系、ソフトコンピューティング

出典: <http://www.bioele.nuee.nagoya-u.ac.jp/>

名古屋大学 大学院 人間情報学研究科 物質・生命情報学専攻 情報自然環境論講座/情報処理論講座 峯村・内山研究室	
研究分野	情報工学、機械工学、数学、物理学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	13名
代表的な研究者	峯村 吉泰、内山 知実
研究概要	液体と気体、液体と固体粒子といった二相流体の流れを主な対象として数値シミュレーションを行ない、二相流モデルの最適化に関する研究を行なっている。また、セルラオートマトンによる自動車の交通流問題、大気汚染の拡散問題などのシミュレーションや、二相流、キャピテーション流れに対する新しいソフトウェア的計測法の開発なども行なっている。
キーワード	流体力学、二相流、数値シミュレーション、セルラオートマトン法、複雑系、ニューラルネットワーク、計測法、Java、環境問題、音声認識、Linux、可視化アニメーション

出典: <http://www.flow.human.nagoya-u.ac.jp/>

郵政省 通信総合研究所 宇宙科学部 宇宙計測研究室	
研究分野	宇宙科学、地球科学、制御工学
研究領域	応用システム
研究規模	3名
代表的な研究者	巖本 巖
研究概要	自然界の中の複雑系を、カオス・フラクタルといった数学的解釈を用いて定量的に調べ、自然界の現象を研究すると共に、通信や制御といった分野への応用の可能性を探っている。例えば、微少な信号に適当な大きさのノイズを加えるとS/Nが良くなる「ノイズレゾナンス」に関する研究など。
キーワード	

出典: <http://www.crl.go.jp/uk/uk321/index.html>

郵政省 通信総合研究所 関西先端研究センター 知識機構研究室	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	9名
代表的な研究者	澤井 秀文
研究概要	神経回路網モデルや知覚系の機能モデルをもとに新しい音声・画像情報処理方式を研究し、通信回線の有効利用、人間-機械間の円滑な情報伝送のための高度な情報処理技術の開発を行なっている。具体的な研究テーマは、知覚機構モデルに基づいた音声・画像処理、神経回路網モデルを用いた情報処理に関する基礎研究、超三角形を用いた3次元図形処理、生物とその進化の情報処理への応用、など。
キーワード	マルコフ確率場モデルを画像処理に適用する、マルコフ確率場モデルとニューラルネットワーク、PCA ニューラルネットワークモデル、受容野の自己組織的形成、生物とその進化の情報処理への応用、顔の3次元画像の再構成への進化的計算の応用

出典: <http://www-karc.crl.go.jp/avis/index-J.html>

琉球大学 工学部 情報工学科 複雑系工学研究室	
研究分野	情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	5名
代表的な研究者	遠藤 聡志、山田 孝治
研究概要	競合共進化、囚人のジレンマなどのゲーム理論、遺伝的アルゴリズムやニューラルネット、免疫アルゴリズムなどを利用したマルチエージェントシステム、決定木、創刊ルールに基づく完成情報処理、遺伝的アルゴリズムやポテンシャル法などによる最適化システムなど複雑系に関する情報処理を研究している。
キーワード	

出典: <http://www.eva.ie.u-ryukyu.ac.jp/Index.html>

資料B 複雑系研究一覧（欧米編）

第5.2節で調査した欧米における複雑系研究事例の一覧

Adaptive Computation Group, Computer Science Department, University of New Mexico	
研究分野	情報工学、生物科学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	19名
代表的な研究者	David Ackley, Stephanie Forrest, Barak Pearlmutter, Lance Williams
研究概要	自然におけるパターン形成系(生物学、物理学、化学、社会組織等)に内在されるモデルの理解と、計算における組織化の原理を研究している。なかでも、生物学と計算評価の相互作用を主として取扱う。現代的なコンピュータシステムは生物系と共通の性質を持つとの仮定から、コンピュータは生物に倣って設計されるべきだとの立場を持つ。モデル形成プロジェクトの対象は、定性的性質を理解するための抽象的な人工生命モデルから、定量的予測を可能にするための現実データに基づく具体的なモデルまで幅広い。現在進行中の研究プロジェクトには、音響情報源分離、計算神経科学、計算的免疫システム、遺伝アルゴリズムの基礎、免疫システムモデルなどがある。
キーワード	

出典: http://www.cs.unm.edu/~immsec/adaptive-web/ac_main.htm

Artificial Intelligence Group, Department of Computer Science, University of Manchester	
研究分野	情報工学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	18名
代表的な研究者	David S. Bre, Rob Dixon, Ulrich Nehmzow, Ian Pratt-Hartmann, Jonathan Shapiro, Mary McGee Wood, Nick Filer, Alan Rector
研究概要	人工知能に関する研究グループである。 事例ベース推論 — 大量の過去の事例から最も「似た」ケースを検索し、それに基づき推論を行なう機構。これまでに CRASH というプロトタイプを開発した。現在はその応用を研究中である。 知識表現 — 医療情報、生物情報科学、マルチメディアシステムなどを対象として、知識の表現形式の研究開発を行なっている。 機械学習、ニューラルネットワーク、遺伝アルゴリズム — 機械学習の方法論は、これまでアドホックに決められることが多かったが、統計的手法を用いて学習の構造やパラメータを機械的に設計する方法を研究している。他にも、記憶、モバイルロボット、自然言語、時空間推論などの分野に関して人工知能研究を行なっている。
キーワード	Machine learning, Mobile robotics, Case-based reasoning

出典: <http://www.cs.man.ac.uk/ai/>

Artificial Life Laboratory, School of Electronic Engineering, Faculty of ENgineering and Design, Dublin City University	
研究分野	情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	—
代表的な研究者	Barry McMullin
研究概要	仮想化学における自己言及的(Autopoietic)エージェントの振舞いを研究中。仮想化学とは、コンピュータシミュレーションによる仮想世界であり、その世界の中で新しい粒子あるいは分子(エージェント)が化学反応を起こす。最近の研究プロジェクトおよび予定しているプロジェクトには、次のようなものがある。 ・オートポイエシス(自己言及・自己制作)の再認識 ・遺伝的コード生成。仮想化学世界の自己言及的エージェントを用いたクラス境界の自動生成の試み。 ・自己言及的エージェントの成長と分裂 ・異なる空間におけるオートポイエシス。現在離散的2次元空間で定義されている仮想化学空間の拡張
キーワード	Virtual Chemistries, The von Neumann Genetic Architecture, evolutionary growth of complexity, The Holland α -Universes, Swarm

出典: <http://www.eeng.dcu.ie/~alife/index.html>

Autonomous Agents Research Group, Electrical Engineering and Computer Science, Case Western Reserve University	
研究分野	制御工学、生物科学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	8名
代表的な研究者	Randall Beer
研究概要	以下の研究を通じて、自律エージェントの適応的行動を調べている。 自律エージェントのための「神経系」の進化 — 自発的エージェントを制御する「神経系」の機能を持つ連続時間リカレント型ニューラルネットワーク (continuous-time recurrent neural networks, CTRNN) を生成するアルゴリズムを研究している。これまでに、走行、歩行、意志決定、強化学習、視覚ガイドによる方向の識別と位置決定などに適した CTRNN を開発した。 適応的行動の力学 — 動的システム理論のツールを用い、様々なシステムにおける適応的行動のメカニズムを解析する。小規模 CTRNN の動的な振舞いや、各種の CTRNN、とくに歩行回路に関して解析を行なった。現在は、視覚的ガイドによる物体の識別のための CTRNN の研究と、6足歩行のための分散制御の解析を行なっている。 生物学的ロボティクス — 環境に最も適応した物体として生物をとらえ、その機構を評価することで自律ロボットへの応用を図る研究である。
キーワード	

出典: <http://vorlon.ces.cwru.edu/~beer/group.html>

Biomathematics Graduate Program, Department of Statistics, North Carolina State University	
研究分野	数学、生物科学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	1名
代表的な研究者	Thomas B. Kepler
研究概要	理論生物学、免疫学、進化、動的システムなどを研究。生物学的現象を「創発」としてとらえ、構成要素の複雑な相互作用のために個々の独立した要素を知るだけでは全体の予測は困難となるようなものと考え。生物学システムの数学的計算モデル構築することによって、現実の系では困難または不可能な操作を扱うことが可能となる。生物システムの中でもとくに適応と進化に関して興味があり、微生物と脊索動物の免疫系を中心に研究を進めている。
キーワード	

出典: <http://www.stat.ncsu.edu/~Ekepler/>

Bios Group, LP	
研究分野	経済学、社会学、財政学
研究領域	応用システム、実証実験・予測
研究規模	30名
代表的な研究者	Stuart A. Kauffman
研究概要	Stuart Kauffman 博士が1996年に設立したコンサルティング会社である。商品市場での価格設定や、資源の割り当て、急速に変化する企業における組織構造の最適化などのビジネス上の諸問題を、複雑性の科学における適用することで解決を図る。市場の振舞いからサプライチェーンマネジメントまで、様々な問題をエージェントベースのシミュレーション技術を用い解析する。その他にも、遺伝的アルゴリズムや動的スケジューリングのための強化学習の技術などを用いて研究を行なっている。
キーワード	agent-based simulation, genetic algorithms, reinforcement learning, data mining

出典: <http://www.biosgroup.com/>

Center for Complex Systems Research, Department of Physics, University of Illinois at Urbana Champaign	
研究分野	生物科学、物理学、化学、天文学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	—
代表的な研究者	Alfred W. Hubler
研究概要	乱流、稲妻、インターネット上の情報フローなどの大規模な流体を対象に、それらのシステムにおける現象を研究する。このような複雑系の記述には、非線形力学、ニューラルネット、セルラーオートマタ、遺伝アルゴリズム、人工生命モデルなどを用いる。自己組織、あるいは自己修復を可能とし、システムをとりまく環境を理解することができるような単純な物理システムの構築を目指している。研究範囲は、セルラーオートマタ、カオス制御、乱流の実験研究、カオス電子回路、フラクタル凝縮パターンなど。
キーワード	

出典: <http://www.ccsr.uiuc.edu/>

Center for Neuro-Mimetic Systems (MANTRA), Computer Science Department (DI), École Polytechnique Fédérale de Lausanne	
研究分野	情報工学、生物科学、制御工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	8名
代表的な研究者	Wulfram Gerstner, Dario Floreano
研究概要	LAMIから派生した、神経生理学を基本とした新しい分野の研究を行なうグループである。現在は次のテーマの研究を実施している。 ・ニューロン発火のモデル。脳が処理している情報伝達機構自身をモデリングする試みである ・各分割ネットワークがそれぞれのサブ問題を解決するような混合エキスパートモデル ・聴覚システムにおける短時間情報処理モデル ・ロボットナビゲーション ・ロボット学習 ・注意喚起によるパターン認識。注目している情報を選択的に認識する機構の解明 ・ニューラルネットワーク応用
キーワード	

出典: <http://diwww.epfl.ch/mantra/>

Center for Nonlinear and Complex Systems, Duke University	
研究分野	数学、情報工学、機械工学、動物学、地学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	27名
代表的な研究者	Richard Palmer, Daniel McShae
研究概要	CNCS は、非線形力学、カオス、パターン形成、多次元自由度を持つ複雑系・非線形系の研究と教育を助成する学際的な組織である。複雑系に関連する 세미나や学会を定期的に主催し、かつ複雑系に関連した大学院教育なども行なっている。関連する他の学部や学科は、計算機科学、地質学、数学、工学など。
キーワード	

出典: <http://www.phy.duke.edu/research/cnscs/>

Center on Social and Economic Dynamics, The Brookings Institution	
研究分野	経済学、社会学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	16名
代表的な研究者	George Akerlof, Gary Burtless, Joshua Epstein, Carol Graham, John Steinbruner, Peyton Young
研究概要	民間シンクタンクによる組織で、経済や社会問題に関して学際的な研究を行なっている。研究対象の例には、人々の期待する「公平」と実際の社会条件における「公平」をどう評価するか、社会において個々の行動が統合するとどういった効果が生じるか、などがある。後者は、エージェントベースのコンピュータモデルを用いた研究である。
キーワード	

出典: <http://www.brookings.org/dynamics/default.htm>

Complex Systems Group, Theoretical Division, Los Alamos National Laboratory	
研究分野	物理学、生物科学、情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	33名
代表的な研究者	Gary Dean Doolen, Robert M. Farber, Alan Lapedes
研究概要	複雑な問題を解く様々な新しい手法を開発し、各種の問題について適用を試みている。研究対象は、計算モデル、量子コンピュータ、微細技術(ナノテクノロジー)など。現在のプロジェクトには、遺伝子規則モデル、ニューラルネットと情報理論を用いた蛋白質およびDNA系列の解析、フロントトラッキング技術、レーザー-プラズマ相互作用などがある。
キーワード	Scaleup Techniques, Cycle Expansions, Global Epidemic Modeling, Quantum Computing Tutorial

出典: <http://t13.losalamos.org/index.html>

Complex Systems Research Group, Department of Physics and Nuclear Engineering, Technical University of Catalonia	
研究分野	物理学、生物科学、情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	13名
代表的な研究者	Ricard V. Sole, Jordi Delgado, Jordi Bascompte, Susanna C. Manrubia, Bartolo Luque
研究概要	カタロニア工科大学の物理原子力学部に設立されている複雑系研究グループで、複雑性の理論の解明を目標として、複雑適応システムの研究を進めている。主な研究分野は以下の通りである。 ・脳のダイナミクス ・RNAウィルスの進化 ・流動的ニューラルネットワークと共同的計算 ・カウフマンネットワーク ・大規模進化 ・熱帯雨林のダイナミクス ・理論生態学 ・カオスシステムの制御 ・大域的進化アルゴリズム
キーワード	

出典: <http://complex.upc.es/>

Complex Systems Research Group, Physics and Engineering Physics, Chalmers University of Technology	
研究分野	物理学、情報工学、経済学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	5名
代表的な研究者	Kristian Lindgren, Mats Nordahl, Peter Nordin
研究概要	社会における天然資源の維持利用のための物理的な基準に関し、地方、国家、地球規模の各レベルで検討を行なっている。一方で、天然資源の利用に関する経済的な解析や経済理論も実施中である。その他、核の非拡散のための技術やセキュリティ分野の研究も実施している。当研究グループの基盤分野は物理学だが、熱力学、情報理論、複雑系に関する研究も行なっている。複雑系に関する具体的な研究分野の例には、次のようなものがある。 ・複雑系動的システムのシミュレーションと解析 ・進化的モデル ・複雑系解析のための概念と手法
キーワード	

出典: <http://www.frt.fy.chalmers.se/frteng.html>

Complex Systems and Nonlinear Dynamics, Department of Physics, University of Illinois at Urbana Champaign	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	8名
代表的な研究者	D. K. Campbell, S.-J. Chang, A. W. Hubler, P. W. Phillips
研究概要	Complex Systems and Nonlinear Dynamics 研究は、イリノイ大学先端科学技術ベックマン研究所と同大学物理学科により設立された学際的な研究プログラムである。次に挙げるテーマで、複雑系と非平衡系に関する研究を行なっている。 ・複雑ダイナミクスの制御 ・力学モデル生成のためのデータ解析 ・複雑系の統計的記述 ・流体、液晶、セルラーシステムの時空間力学 ・量子カオス ・非平衡系のパターン ・マルチアトラクタシステム ・学習と適応の力学 ・進化的プロセス
キーワード	

出典: http://www.physics.uiuc.edu/education/graduate/admission/\thesis_areas/complex_nonlinear.html

Computational Semantics Laboratory, Center for the Study of Language and Information, Stanford University	
研究分野	言語学、情報工学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	6名
代表的な研究者	Stanley Peters
研究概要	スタンフォード大学の言語情報研究センターにおける計算意味論の研究グループである。決定的意味論における文脈の役割を中心に研究している。興味のあるテーマは、言語、対話、計算、推論のモデル、とくにそれらが発生した文脈を考慮した理論的モデルである。また、現実世界の問題にそれらの研究結果を応用することも研究している。応用の対象は、情報検索、自然言語処理、対話システム、機械翻訳、プログラミング言語、強調エージェントなど。
キーワード	semantics, context

出典: <http://hypatia.stanford.edu/semlab/>

Computational and Applied Mathematics Program (CAMP), University of Chicago	
研究分野	数学、宇宙科学、生物科学、情報工学、物理学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	22名
代表的な研究者	Robert Almgren, Fausto Cattaneo, Peter Constantin, Ovidiu Costin, Jack Cowan, Todd Dupont, Leo Kadanoff, Norman Lebovitz, L. Mahadevan, Andrea Malagoli, Robert Rosner
研究概要	シカゴ大学の、計算機科学、物理学、天文学、宇宙科学など各学科およびジェームスフランクリン研究所による、学際的な計算応用数学研究プログラムである。水滴の構造、粒子堆積の力学、バクテリアコロニーのパターン生成、凝固系、結晶の成長、乱流、動的システムとカオスなどの物理現象を対象に、数学的手法を用いて研究を進めている。
キーワード	

出典: <http://www.cs.uchicago.edu/groups/camp/>

Control Engineering Laboratory, Department of Automation and Systems Technology, Helsinki University of Technology	
研究分野	制御工学
研究領域	応用システム
研究規模	27名
代表的な研究者	Heikki N. Koivo, Kai Zenger, Jari-Pekka Ruonio, Erkki Solin, Maija-Liisa Herto
研究概要	知的制御システムと学習制御システムを研究している。エレベータや、裁断機、電気モータ、工業システム、ロボットなどが知的制御の対象である。研究分野は、ニューラルネットワークやファジイ理論・AIを利用したソフトコンピューティング、制御工学におけるエキスパートシステムの連結、動的システムのロバストなモデリングなど。
キーワード	

出典: <http://www.hut.fi/Units/Control/>

Department of Economics and the Graduate Field, Cornell University	
研究分野	経済学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	1名
代表的な研究者	Larry Blume
研究概要	経済理論、ゲーム理論、公的金融など。現在は、市場とゲームにおける進化のプロセスを研究している。最近の研究テーマには次のようなものがある。 ・ 最適反応戦略の変化における統計的メカニクス ・ 推論に基づく期待と学習 ・ 完全逐次平衡の代数幾何学 ・ 競争的平衡の代数幾何学 ・ ノイズの重要性 ・ 前向きなプレーヤに関する進化的平衡状態 ・ 人口ゲーム ・ 市場における最適性と自然淘汰
キーワード	

出典: <http://www.arts.cornell.edu/econ/faculty/blume.html>

Department of Economics, School of Humanities and Sciences, Stanford University	
研究分野	経済学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	1名
代表的な研究者	Kenneth J. Arrow
研究概要	情報と組織の経済、共同体の意志決定、一般平衡理論、正当性理論などに関する複雑系の研究を行なっている。現在の研究対象は、交渉、経済における情報とコミュニケーション、独占的な競争環境における平衡、収入分布の遷移など。
キーワード	

出典: <http://www-econ.stanford.edu/econ/faculty/arrow.html>

Department of Economics, University of Wisconsin	
研究分野	経済学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	1名
代表的な研究者	William Brock
研究概要	研究対象は、統計的メカニズム、エージェント計量経済学、進化経済学、分岐のメカニズム、人工生命シミュレーションの数学モデルなど。計量経済学と社会的相互作用、進化のダイナミクスなどを複雑系としてとらえ、それらの分野間における技術交流を目指している。様々な行動をとるエージェントから形成されるシステム上で、そのエージェントの種類を極限まで増大させた場合を想定した理論であるラージタイプ極限理論(Large Type Limit Theory)を提唱している。人工経済市場など各種のモデルに適用を試み、理論の検証を行なっている。
キーワード	

出典: <http://www.ssc.wisc.edu/~wbrock/>

Department of Economics, University of Wisconsin	
研究分野	経済学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	1名
代表的な研究者	Blake LeBaron
研究概要	カオス理論を中心とした複雑系科学の手法の、経済システムに対する適用を研究している。人工的な株式市場のモデルや人工的金融市場モデルなどに、カオス理論、遺伝的アルゴリズム、人工知能エージェントなどの手法を適用し、計算機シミュレーションを行なっている。
キーワード	chaos theory

出典: <http://www.econ.wisc.edu/~blake/>

Department of Mathematics, University of Wisconsin	
研究分野	数学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	1名
代表的な研究者	David Griffeath
研究概要	無秩序な初期状態から空間的構造を構成する局所的並列更新規則の、コンピュータグラフィックスやアニメーションを用いた可視化を研究していた。現在はランダムセルラオートマタの自己組織化を研究中。セルラオートマタ (cellular automata, CA) 規則のいくつかはCA-LAB というシミュレーションパッケージに収録されている。自己組織化を、原始スープ(地球ができたころの海)からの進化として考えている。
キーワード	primordial soup

出典: <http://psoup.math.wisc.edu/welcome.html>

Department of Theoretical Biology / Bioinformatics Group, Utrecht University	
研究分野	生物科学、情報工学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	11名
代表的な研究者	Paulien Hogeweg, Rob de Boer, Sasha Panfilov
研究概要	形式的モデルを用いて、生物学の基礎を研究している。研究対象の例は、生態系、空間的パターン形成、(分子の)進化、免疫学、行動生物学などである。定式化の手法には、数式モデルから、セルラオートマタ、遺伝的アルゴリズム、離散時間の要素指向的シミュレーションモデルまで幅広い方法を採用し、研究を進めている。
キーワード	Bioinformatics, Pattern recognition, Non-Linear Systems, Theoretical Ecology

出典: <http://www-binf.bio.uu.nl/>

Divison of Neural System and Artificial Life, Institute of Psychology, National Research Council	
研究分野	制御工学、生物科学、情報工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション、応用システム
研究規模	14名
代表的な研究者	Stefano Nolfi, Alberto Zani
研究概要	人工生命の観点における人工的神経系の研究と、視覚および聴覚の神経生理学的メカニズムの研究、といったふたつの領域に関して調査研究を行なっている。前者はふたつのサブ領域に分割されており、基本的なセンサ-モータ系のシミュレーションと、人間の行動などに見られるより進化した行動のシミュレーションのそれぞれを研究している。基本的なモデルの研究は制御システムや自動ロボットの行動の理解を目標とし、高度なモデルでは社会行動の創発やニューラルネットワークによる組織的行動の獲得を考察する。それらを統合した応用システムも研究の対象である。一方、視覚・聴覚メカニズムの研究では、反応および電子的計測を利用して、脳のイメージ生成機構の解明を進めている。
キーワード	

出典: <http://www.ip.rm.cnr.it/nsal/nsal.html>

Early Childhood Development, Vanderbilt University	
研究分野	心理学、教育学
研究領域	応用システム
研究規模	1名
代表的な研究者	Irving Lazar
研究概要	乳児や幼児とその家族のための教育プログラムのデザインと評価を行なっている。研究プロジェクトには、理想的な条件のもとでの幼児の認識・社会に対する順応性、幼児の知覚様相の評価などがあり、幼少期の神経の発達を理解するために、複雑系の理論を応用することを研究している。
キーワード	

出典: <http://www.vanderbilt.edu/kennedy/people/lazar.html>

Faculty of Life Sciences, Bar-Ilan University	
研究分野	数学、生物科学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	5名
代表的な研究者	Avidan U. Neumann
研究概要	研究対象と研究目標は、生物学、とくに、ウイルス学と免疫学におけるシステムの数学モデル生成、および、一般的な複雑系や非線形力学のモデル化である。現在まで次のような研究を実施した(現在研究中のものを含む)。 ・ HIV のダイナミクスおよびそれに関連する AIDS 進行のモデル生成 ・ C型肝炎ウイルスの進化とダイナミクスのモデル作成 ・ HIV の転移、進行に関する感染者の遺伝的効果 ・ 抗ウイルス/免疫療法期間中のHCV感染のダイナミクス ・ 教育ツールとしての免疫系シミュレーション ・ 免疫記憶のモデル ・ イデオタイプネットワークのモデル
キーワード	

出典: <http://www.biu.ac.il/LS/staff/avidan.html>

Independent Component Analysis (ICA) Research Group, Laboratory of Computer and Information Science, Helsinki University of Technology	
研究分野	数学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション、応用システム
研究規模	10名
代表的な研究者	Erkki Oja, Juha Karhunen
研究概要	独立成分解析(Independent Component Analysis, ICA)を提唱し、その応用研究を進めている。ICA の応用事例には、ブラインドソースセパレーション(Blind Source Separation, BSS)などがある。BSS とは、複数の独立な情報源からの混ざりあったデータから、元の情報を復元するという問題である。現在の研究プロジェクトは、ICA を高速に計算する近似アルゴリズム、ICA の画像処理への適用、ICA を用いた脳波記録(Electroencephalography, EEG)/ 脳磁気図(Magnetoencephalography, MEG)の解析など。
キーワード	ICA, FastICA

出典: <http://www.cis.hut.fi/projects/ica/>

Interdisciplinary Research Area (Complex Systems), Department of Physics, University of Arizona	
研究分野	物理学、数学、生物科学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	—
代表的な研究者	Robert Parmenter, Alwyn C. Scott, Daniel L. Stein
研究概要	各研究者は、下記の分野で研究を進めている。カオス理論、とくに量子機械システムにおける決定論的カオス。非線形力学。調和的分子に関する量子効果の研究と、脳/心や意識の数学および哲学的研究。凝固物質中の自然な乱雑さと無秩序の研究。詳細なバランスを失ったシステムにおける統計的回避問題の新しい理論。大型分子、ヘモグロビン分子中の酸素の拡散の生物物理学的研究。ショートレンジスピングラスの規定状態の多様性の研究。多くの準安定状態を持つ複雑系力学に対する新たなアプローチ。
キーワード	escape from a metastable state, spin glasses and other systems with quenched disorder, protein biophysics

出典: <http://soliton.physics.arizona.edu:80/physics/research.html#interdis>

Internet Ecologies Area Project, Xerox PARC	
研究分野	情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	—
代表的な研究者	Research Center, Bernardo Huberman, Tad Hogg, Rajan Lukose, Lada Adamic, Oliver Guenther
研究概要	社会・コンピュータの両方の観点から、局所的な行動と大規模分散システムの挙動の關係に焦点を当てて研究を実施している。例題は、インターネット、分散情報処理、ヒューリスティックな検索、生態系、社会組織、市場など。非線形力学および統計物理学に基づいたアプローチを採用し、問題解決におけるエージェント同士が強調することの価値や、動的な資源の割り当て、自発的な強調行動の発生などを明らかにすることを目標とする。最近の研究結果には、マルチエージェントシステム、計算的困難さを含む探索問題、マーケットベース・ドキュメントサービスなどがある。
キーワード	

出典: <http://www.parc.xerox.com/istl/groups/iea/>

Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	約110名
代表的な研究者	Gerard Weisbuch
研究概要	統計物理学研究所は以下の4つの主要な分野に関して複雑系に関する研究を行っており、これらは密接な関係を保っている。 1. 乱流と非線形現象 2. 統計物理学と凝縮物質 3. 組織的分子システム 4. 生命システムの物理学 さらに研究チームとして、次の10つが挙げられる。ヘリウム:キャビテーションと湿化 / 凝縮物質理論 / 複雑ネットワークと認識システム / 生体高分子の物理 / 組織的分子システム / 不安定性の非線形理論 / 乱流とパターン形成 / カオスと乱流 / 薄膜、浸透と成長 / 非線形物理学
キーワード	

出典: <http://www.lps.ens.fr/index.ang.html>

Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology	
研究分野	機械工学、制御工学、情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	—
代表的な研究者	Seth Lloyd
研究概要	研究対象は情報と機械である。大量の情報を取得し処理するシステムを複雑系であるとし、以下に挙げるような複雑系に関する研究を行なっている。 ・雑音を含む非線形システムの制御 ・ヒートエンジンの熱力学 ・複雑系の描写と制御 また、これらのシステムは物理法則に従って情報を処理する。したがって、ノベルコンピュータを作るには、非線形力学、統計力学、量子力学などの相互作用が関連している。これらに関し、以下のような情報処理関連研究も行なっている。 ・量子コンピューティング ・量子コントロール
キーワード	

出典: <http://me.mit.edu/research/slloyd.html>

Microprocessor and Interface Laboratory (LAMI), Computer Science Department (DI), École Polytechnique Fédérale de Lausanne	
研究分野	情報工学、制御工学
研究領域	応用システム
研究規模	17名
代表的な研究者	Jean-Daniel Nicoud, Olivier Michel
研究概要	インテリジェント・モバイルロボットと制御リアルタイムソフトウェアの構築、および、理論と応用の両側面からのニューラルネットワーク研究の、ふたつの分野に関して研究を実施している。前者は、様々なセンサ、マイクロプロセッサ、ニューラルネット、ファジイ論理などを利用して構築されたロボット群(Khepera)による協調動作や社会行動の獲得を研究し、後者は、ニューラルネットワーク向けの専用VLSI回路の設計やシストリック方式コンピュータの開発を行なっている。
キーワード	intelligent mobile robots, Pemex robot, sensor for humanitarian demining, newral networks, Smakys

出典: <http://diwww.epfl.ch/lami/>

Molecular Neurobiology Lab (MNL-S), The Salk Institute for Biological Studies	
研究分野	生物科学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	—
代表的な研究者	Charles Stevens
研究概要	ソーック研究所は、カリフォルニアに設立された私立非営利組織であり、生物学や健康に関する研究を行なっている。脳の組織や機能、遺伝子活動の制御、がん分子の原因、AIDS、その他の疾患などが研究対象である。分子神経生物学研究室では、シナプスの伝達機構のメカニズムを中心に、分子生物学、電気生理学、解剖学、理論数学からのアプローチでこれらの問題の解明を試みている。
キーワード	

出典: <http://www.salk.edu/faculty/stevens.html>

NOBOTS Research Group, Stanford Robotics Laboratory, Computer Science Department, Stanford University	
研究分野	制御工学、情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	26名
代表的な研究者	Daphne Koller, Nils Nilsson, Yoav Shoham
研究概要	エージェントを中心に、人工知能を研究している。具体的な研究対象は、確率的推論、ゲーム理論、アルゴリズム、有限論理モデル理論、自律エージェント、機械学習、適応的情報検索エージェント、マルチエージェントシステムのダイナミクス、知識表現、エージェントの内部状態など。
キーワード	

出典: <http://robotics.stanford.edu/groups/nobots/>

Neural Networks Research Centre, Helsinki University of Technology	
研究分野	情報工学
研究領域	応用システム
研究規模	10名
代表的な研究者	Teuvo Kohonen, Leila Koivisto, Erkki Oja
研究概要	Kohonen教授の提案した自己組織化マップ(Self-Organizing Map, SOM)および学習ベクトル量子化(Learning Vector Quantizing, LVQ)アルゴリズムの理論と応用の研究を行なっている。次のような、SOM を応用した各種アプリケーションが研究されている。 ・ 自動音声認識 ・ 臨床用発声分析 ・ 工業プラント/工程の状況モニタ ・ 衛生画像の分類 ・ 脳信号分析 ・ 大量文書からの情報検索(WEBSOM) ・ 大量統計データの分析および可視化
キーワード	Self-Organizing Map (SOM), Learning Vector Quantizing (LVQ), WEBSOM

出典: <http://www.cis.hut.fi/nnrc/>

Physics of Complex Systems Group, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen	
研究分野	物理学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	32名
代表的な研究者	Per Bak, Jakob Bondorf, Andy Jackson, Benny Lautrup, Alvaro Corral
研究概要	コペンハーゲン大学ニールスボーア研究所、同大学化学科、デンマーク工科大学(Technical University of Denmark)物理学科などの一部と共に構成される研究グループである。漏斗やパイプの中を通過する粒子の流れを研究する粒子流研究グループと、平衡力学や波動関数・振動解析などを研究する音響カオス理論グループなどに分かれて複雑系の物理に関する研究を進めている。
キーワード	

出典: <http://www.nbi.dk/CATS/PCS.html>

Santa Fe Institute	
研究分野	物理学、経済学、数学、情報工学、生物科学、化学、社会学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	27名
代表的な研究者	W. Brian Arthur, James Crutchfield, Walter Fontana, Murray Gell-Mann, Melanie Mitchell, Cristopher Moore, Mark Newman
研究概要	非営利の私立研究組織で、複雑系に関する話題であれば何でも、手広く学際的に研究・教育を行なっている。現在の主要な研究テーマは次に挙げるように多岐にわたっている。 現在の研究テーマ: 適応エージェントシミュレーション / 適応的計算 / 生物学的ネットワーク / 認識 / 計算のダイナミクスおよびインタフェース / 計算的分子生物学 / 力学 / 分散学習 / 生態学 / 経済学 / 人間社会の進化 / 言語の進化 / 進化的セルオートマトン / 大域的問題のための進化的局所ルール / HIVのダイナミクスと進化 / 生命の起源 / 理論免疫学 / 理論神経生理学
キーワード	

出典: <http://www.santafe.edu>

Social and Decision Sciences Department, Carnegie Mellon University	
研究分野	社会学、経済学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール
研究規模	1名
代表的な研究者	
研究概要	個々の適応エージェントの相互作用から生じる集団行動のパターン生成原理の理解を目標として、社会システムで創発する複雑な適応行動を中心に研究を行なっている。複雑系の振舞いを理解するために、人工適応エージェントの相互作用で問題の解決を図る計算モデルを用い解析を行なう。各エージェントは、遺伝アルゴリズムのような単純な学習アルゴリズムで記述され、様々な性質を持つように自身の行動を適応的に修正することができる。このようなアプローチで、新しい仮説の開発と検証を進めている。解析対象の具体例は、囚人のジレンマに関する協調の創発、オークション市場における入札行動など。
キーワード	computational economic modeling, "rational giving"

出典: <http://zia.hss.cmu.edu/miller/>

Stanford Linguistics Department, Stanford University	
研究分野	言語学
研究領域	応用システム
研究規模	—
代表的な研究者	David Beaver
研究概要	形式的意味論および自然言語の語用論を研究している。計算的言語学、とくに創発的計算言語学の分野を中心として研究を行っており、言語の発生のシミュレーションや、人工システムにおけるコミュニケーションを研究中である。
キーワード	comptational evolutionary linguistics

出典: <http://www.stanford.edu/~dib/>

The Brown Lab Group, Department of Biology, University of New Mexico	
研究分野	生物科学、地学
研究領域	モデル・複雑系研究ツール、数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	20名
代表的な研究者	James Brown
研究概要	マクロ生態学と生物地理学研究プロジェクト:生物種の絶滅・分布・多様性に関する大規模な統計的アプローチであるマクロ生態学の構築と生物地理学の研究を実施している。現在は主として種の多様性における地理的パターンと規模に焦点を当てて研究中である。規模に関する研究では、生態系における個体の大きさの重要性に着目し、フラクタル幾何学と資源ネットワーク分岐の流体力学に基づいた汎用的なモデルを開発した。他方、地理的パターンに関する研究では、地球における生命の拡大パターンを統括的に説明する方法を探っている。これらは、フィールドワークや大量データの解析だけでなく、数学的シミュレーションあるいはコンピュータによる人工生態系シミュレーションを用いて研究されている。
キーワード	

出典: <http://biology.unm.edu/~jhbrown/>

The Feldman Lab, Department of Biological Sciences, Stanford University	
研究分野	生物科学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション
研究規模	44名
代表的な研究者	Marcus W. Feldman
研究概要	進化的生物学における諸問題を、数学的モデルを用いて解析することを中心に研究を実施している。研究は次の4領域に分かれている。第一に、自然淘汰および組み替えによる複雑な遺伝システムの進化のモデルを作成し、シミュレーションにより解析を行なう。第二番目は、人工知能の手法と生物学的モデルの中間的な立場で、学習の進化を検証する。第三領域は、生物学的進化および文化的進化の相互作用を調査する。第四の領域は、DNA分布の観測による分子の進化数理統計的解析である。
キーワード	

出典: <http://www-evo.stanford.edu/>

The Prediction Company	
研究分野	経済学
研究領域	実証実験・予測
研究規模	—
代表的な研究者	J. Doyne Farmer, Norman Packard
研究概要	スイス・ユニオン銀行(UBS)の関連組織で、1991年に Santa Fe で設立された金融関連研究組織である。カオス理論と非線形力学を応用し、金融市場における先進的な予測技術と計算機支援金融取引ツールの活用を研究している。
キーワード	

出典: <http://www.predict.com/>

The Program for the Study of Complex Systems, College of Literature, Science, and the Arts, University of Michigan	
研究分野	経済学、数学、物理学、心理学、情報工学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	35名
代表的な研究者	John Holland
研究概要	非線形、動的な適応システムの研究と教育を促進するために設立されたミシガン大学による学際的な複雑系研究プログラムである。自己組織化や、フィードバック、適応などの仕組みを持つ様々な異なる系は、基本的に共通な構造を持つとの認識を基本として、それらの構造的な類型を研究することにより各分野における解析手法の他分野への応用を狙っている。また逆に、あるシステムの理解を深めることが、複雑系の振舞いの一般的な構造を明らかにするという目的もある。研究グループは、伝達解析グループ、パターン形成グループ、政策的経済研究グループなど。
キーワード	

出典: <http://pscs.physics.lsa.umich.edu/pscs.html>

Theoretical Astrophysics Group (T-6), Theoretical Division, Los Alamos National Laboratory	
研究分野	宇宙科学、情報工学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション、応用システム
研究規模	20名
代表的な研究者	Wojciech H Zurek
研究概要	N体問題など多体系のシミュレーションや、その応用としての宇宙に関する諸問題の研究を行なっている。一方で、それらのシミュレーションを行なうための計算環境の研究も実施しており、Linuxを16台接続してひとつの並列コンピューティング環境を構築するプロジェクトなども行なっている。
キーワード	

出典: <http://qso.lanl.gov/>

Theoretical Biochemistry Group, Institute for Theoretical Chemistry, University of Vienna	
研究分野	生物科学、化学
研究領域	数値計算・計算機シミュレーション、応用システム
研究規模	23名
代表的な研究者	Peter Schuster, Peter Wolschann, Peter F.Stadler, Walter Fontana, Ivo L. Hofacker
研究概要	以下に挙げるようなテーマについて、並列計算機など強力なコンピュータを利用したコンピュータシミュレーションによる解析や研究を行なっている。とくに、RNA 情報に関しては、RNAの2次構造に関するソフトウェアパッケージを公開中である。 ・小規模RNA分子の3次元構造 ・バイオポリマーの展開 ・自己触媒性ネットワークの構造的摂動 ・ニューラルネットワークの蛋白質空間への写像 ・蛋白質空間の探求 ・RNAウイルス遺伝子に格納された2次構造の同定 ・分子変換における進化 ・バイオポリマーのグラフ理論的性質 ・AlChemY プロジェクト
キーワード	

出典: <http://www.tbi.univie.ac.at/>

Theoretical Biology and Biophysics Group (T-10), Theoretical Division, Los Alamos National Laboratory	
研究分野	生物科学、化学、情報工学
研究領域	基礎研究・理論、モデル・複雑系研究ツール
研究規模	32名
代表的な研究者	Alan Perelson
研究概要	生物システムのモデル化と、分子生物科学データの解析とそれに関する情報科学に焦点を当てている。分子生物学における数学的モデル化と計算解析に関しては世界でも有数の研究グループであり、これまでこの分野における様々な外部機関と連携して研究開発を行ってきた。研究は、HIV、インフルエンザ、肝炎などのウイルス性疾患、免疫システムのモデル、レセプター-リガンド相互作用と細胞信号処理、DNA系列に関するパターン認識など多岐にわたる。
キーワード	

出典: <http://www.t10.lanl.gov/>

Theoretical Condensed Matter Physics, Physics Department, Princeton University	
研究分野	物理学、生物科学
研究領域	基礎研究・理論
研究規模	15名
代表的な研究者	Boris Altshuler, Philip W. Anderson, Duncan M. Haldane, David Huse, Stanislas Leibler, Shivaji L. Sondhi
研究概要	量子多体系理論、統計的メカニズム、生物学的システム、非平衡領域の物理などの分野に関する研究を行なっている。量子多体系分野は、高温超伝導、量子ホール効果、量子磁性、メゾスコピック、局在性、量子カオスなど。統計的メカニズムでは、スピングラスの振舞い、超伝導の渦状態などの複雑系に関する問題を研究を扱う。生物学システムの研究ではたんぱく質の自己形成ダイナミクスや分子モーターなど分子レベルの現象やパターン形成を調査している。非平衡領域に関する研究では、化学ネットワーク、ニューラルネットワーク、形態形成と進化などの現象が対象である。
キーワード	

出典: <http://feynman.princeton.edu/cmp/theory.html>

— 禁無断転載 —

複雑系への情報技術の応用に関する調査研究報告書

発 行 平成11年3月

発行所 財団法人 日本情報処理開発協会
東京都港区芝公園3丁目5番8号
機械振興会館内
電話 (03) 3432-9390

10-R 001

